Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica

PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE "*LAYDOWN AREA*" E SUA INFLUÊNCIA NO CONVÉS DO FPSO

Gelder Guerreiro Costa
DRE: 107349121

Professor Orientador
Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Agosto de 2013

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

"PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE *"LAYDOWN AREA"* E SUA INFLUÊNCIA NO CONVÉS DO FPSO"

Gelder Guerreiro Costa – DRE 107349121

Projeto de Graduação submetido ao corpo docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro naval e oceânico.

Aprovado por:

_____

Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc. – COPPE/UFRJ
(ORIENTADOR)

_____

Severino Fonseca da Silva Neto, D.Sc. – COPPE/UFRJ

_____

Rodrigo Klim Gomes, M.Sc. – PUC/Rio

Rio de Janeiro, RJ – Brasil.
Agosto de 2013

PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE "*LAYDOWN AREA*" E SUA INFLUÊNCIA NO CONVÉS DO FPSO

Gelder Guerreiro Costa
Agosto/2013

Orientador: Julio Cesar Ramalho Cyrino

Departamento: Engenharia Naval e Oceânica

Resumo do Trabalho: Neste trabalho será feito o projeto e a análise de tensão, flambagem e fadiga simplificada do módulo de "*laydown area"*. A plataforma chamada *"laydown area"* é uma estrutura de apoio à operação do guindaste em uma unidade de exploração de petróleo do tipo FPSO. Além da análise desta estrutura, será avaliada a necessidade reforçamento do convés do navio na região que receberá esta nova estrutura. A expectativa é chegar a um projeto que apresente uso racional de aço, sem comprometer a integridade da estrutura do FPSO. Em relação ao convés do FPSO, deseja-se apresentar uma configuração que não implique a troca de perfis e/ou chapeamento já existente no convés, restando apenas a possibilidade de acrescentar reforços localizados e desta forma aumentar o aproveitamento da estrutura original do navio e diminuir trabalho na conversão do navio em FPSO.

GUERREIRO COSTA, Gelder

Projeto e análise estrutural de "*laydown area*" e sua influência no convés do FPSO - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

103 p: X; 29,7 cm.

Orientador: Julio Cesar Ramalho Cyrino

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. Laydown Area. 2. Análise Estrutural. 3. Estrutura Offshore. 4. Elementos Finitos.

Referências Bibliográficas: p. 49

I. Cyrino, Julio Cesar Ramalho.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica.
III. Projeto e análise estrutural de "*laydown area*" e sua influência no convés do FPSO / Gelder Guerreiro Costa – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

DEDICATÓRIA

Aos bons professores. Àqueles que não se esqueceram de que um dia também estiveram sentados na carteira da sala de aula. Àqueles que percebem o suor frio do seu aluno na hora da prova. Àqueles que lecionam por amor. Àqueles que lamentam a reprovação de um aluno. Àqueles que percebem as olheiras de quem passou noites sem dormir para cumprir o prazo de entrega do projeto. Àqueles que dão uma segunda chance. Àqueles que são justos. Àqueles que respeitam os alunos. Àqueles que ficarão eternamente nas nossas memórias de gratidão. Fosse eu capaz de retribuir como merecem cada um destes bons professores que me guiaram ao longo da vida...

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a Petrobras e o Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo e Gás (PRH - ANP) pelo apoio e investimento na minha formação acadêmica.

Agradeço a meu orientador neste projeto, Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino pela orientação e enorme compreensão.

Agradeço a meu orientador acadêmico, Prof. Severino Fonseca da Silva Neto, por estar sempre disposto a ajudar, compreender, colaborar, ouvir.

Agradeço à Projemar Estudos e Projetos de Engenharia pela oportunidade, apoio e enorme contribuição nesta minha carreira profissional que se iniciou. Agradeço especialmente aos Engenheiros Heitor Lima, Luiz Augusto Lima, Rodrigo Klim, Eliza Azevedo, Felipe DaEira, Pedro Ivo Macedo, Kazuo Kajishima, Allan Ramos, Higor Pereira e Joseph Carvalho.

Agradeço a todos os amigos que estiveram comigo nesta maratona. Gostaria de preencher uma página com o nome de todos, mas irei me conter e agradecer especialmente àqueles que sofreram junto nesses metros finais de caminhada. Aline Coelho de Assis, Cinthia Costa, Diego Rocha Athayde, Eloana Moreira Coutinho, Fernanda Dias Brandão, Gabriel Tancredi, Julio Cesar Costa, Raphael Taucei Panizzi, Túlio Jaguar: sem vocês eu não teria conseguido.

Por fim, agradeço a Deus, aos familiares, amigos e especialmente a meus pais que sempre estiveram ao meu lado, mesmo estando distantes.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS

1 INTRODUÇÃO

A cada nova descoberta de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, a tarefa de conceituar e projetar estruturas que viabilizem a extração deste recurso torna-se mais desafiadora para a engenharia. A necessidade de projetar estruturas e garantir que estes sistemas sejam eficientes e confiáveis ao longo de anos de operação depende da atuação precisa de engenheiros qualificados. Este desafio requer profissionais de engenharia com capacidade não apenas para executar tarefas, mas também de compreender o desafio imposto e enxergar a possibilidade de novas tecnologias surgirem quando as dificuldades se apresentam.

Ao longo dos anos a indústria do petróleo incorporou com sucesso diversas tecnologias que viabilizaram a expansão da capacidade de produção e a sua eficiência. No que diz respeito ao projeto estrutural dos sistemas flutuantes, uma grande ferramenta disponível são os programas computacionais que permitem a modelação e análise estrutural através do método dos elementos finitos. Com este recurso é possível prever o comportamento estrutural dos sistemas com uma confiável precisão.

2 OBJETIVO

O objetivo central deste trabalho consiste no projeto e avaliação do comportamento estrutural do módulo de "*laydown area*", bem como a sua influência no convés do FPSO. Devido a restrições quanto à troca de chapeamento e perfis do convés do FPSO na região determinada para a laydown, o projeto deve contemplar também a avaliação da eventual necessidade de reforçamento e como realiza-lo mantendo-se o chapeamento e perfis originais. Além disso, deseja-se apresentar uma configuração que facilite a construção, montagem e evite o uso excessivo de aço.

A avaliação do comportamento estrutural será feita através da análise da tensão, flambagem de painéis e fadiga simplificada na conexão entre as bases da "*laydown area*" e o convés do FPSO. Os critérios a serem verificados seguem as normas da Classificadora Det Norske Veritas.

O método dos elementos finitos foi aplicado no desenvolvimento deste trabalho através dos softwares Femap e Nastran, utilizados para a modelação tridimensional da estrutura e o cálculo, respectivamente. Ressalta-se que faz parte do objetivo global deste trabalho, contribuir para uma compreensão geral não apenas de como meramente executar um programa computacional, mas também de como interpretar a situação que se deseja simular para que os resultados obtidos a maior fidelidade possível à realidade. No entanto, detalhes específicos e a base teórica do método dos elementos finitos não fazem parte do escopo deste projeto.

3 *LAYDOWN AREA*

A chamada "*laydown area*" consiste em uma estrutura de apoio às operações do guindaste. Esta estrutura funciona como uma plataforma onde o guindaste pode movimentar e posicionar suprimentos e/ou equipamentos. Esta estrutura possui um posicionamento tal que não poderá ser alterado e suas dimensões são de 9000 mm transversalmente, 5600 mm longitudinalmente e elevação na face superior do chapeamento da plataforma de 1350 mm acima do convés.

I. Posicionamento

Definida a posição do guindaste no arranjo do FPSO, a região da plataforma é então definida de modo a estar próxima do guindaste e com acessos para as rotas de fuga. A elevação da estrutura em relação ao convés principal é definida de modo a facilitar a operação do guindaste, em acordo com a elevação dos módulos diretamente adjacentes a ela.

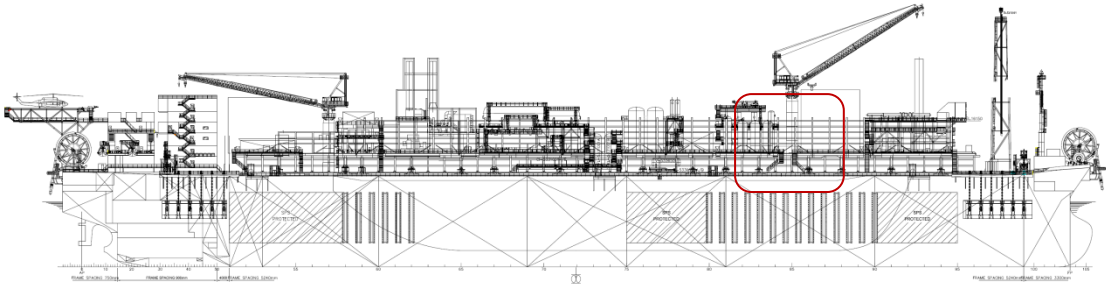


Figura 1: FPSO Vista lateral

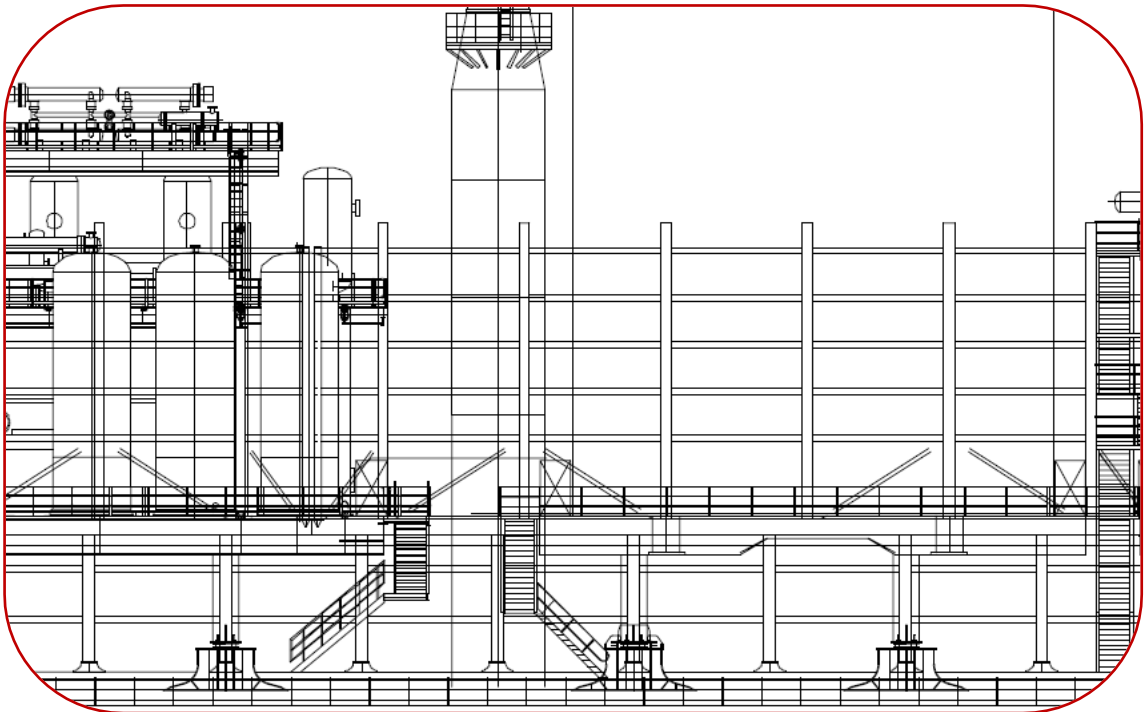


Figura 2: Posição da laydown área de vante

Nas imagens seguintes é possível observar a posição da plataforma em relação ao guindaste e aos módulos do topside.

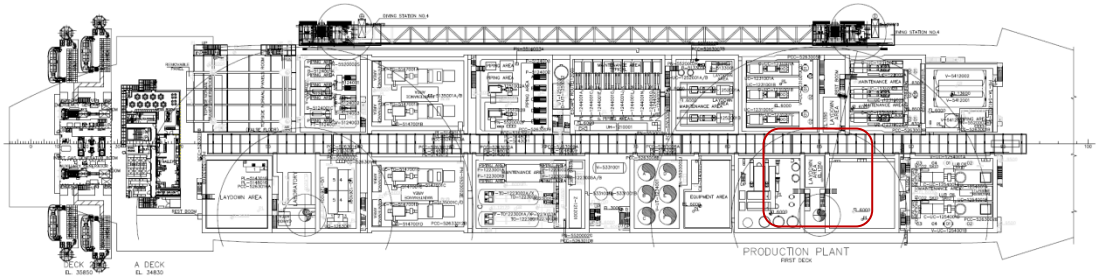


Figura 3: FPSO Vista superior

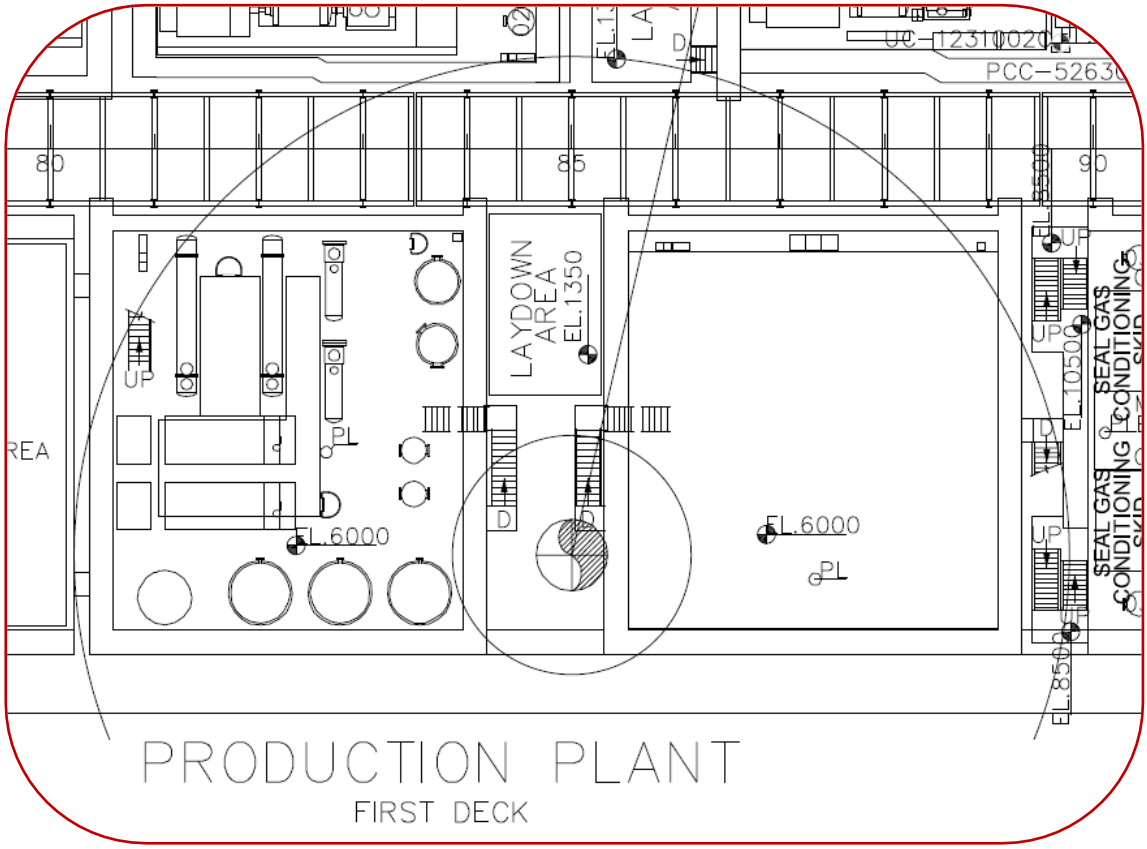


Figura 4: Vista superior da posição da laydown área de vante

II. Posicionamento dos suportes

Na conversão de um petroleiro em FPSO há uma busca pelo aproveitamento máximo do aço estrutural existente, evitando troca de chapeamento e reforçadores sempre que possível. Este princípio visa não apenas uma vantagem financeira com a diminuição dos custos na compra de aço, mas também evitar trabalhos onerosos e perigosos como a soldagem sobre cabeça. Portanto, é realizada uma criteriosa avaliação da estrutura existente antes da concepção da nova estrutura que o convés irá suportar.

As imagens seguintes apresentam as características da estrutura do navio que será convertido em FPSO, especificamente na região que será localizada a laydown. Na figura 5 observa-se que a laydown está posicionada sobre a antepara 85 indicando uma posição favorável para a localização dos stools (suportes) desta plataforma. Observa-se também a posição estratégica de uma sicorda na longitudinal 7 e isto também indica, em princípio, um ponto favorável para localização dos stools.

No entanto, como é comum em um projeto deste porte, há alterações significativas em relação ao projeto básico e o projeto detalhado. Neste caso havia uma indefinição nas características desta sicorda em relação a sua continuidade ao longo de todo o navio. A sicorda em questão faz parte dos novos reforços adicionados para suportar os módulos do topside da plataforma e apoiar os suportes da laydown sobre ela seria uma boa conveniência. Contudo, a incerteza se esta estrutura seria continua ou se seria interrompida em trechos onde não há stools do topside fez com que a posição dos stools da laydown não coincidisse com a sicorda.

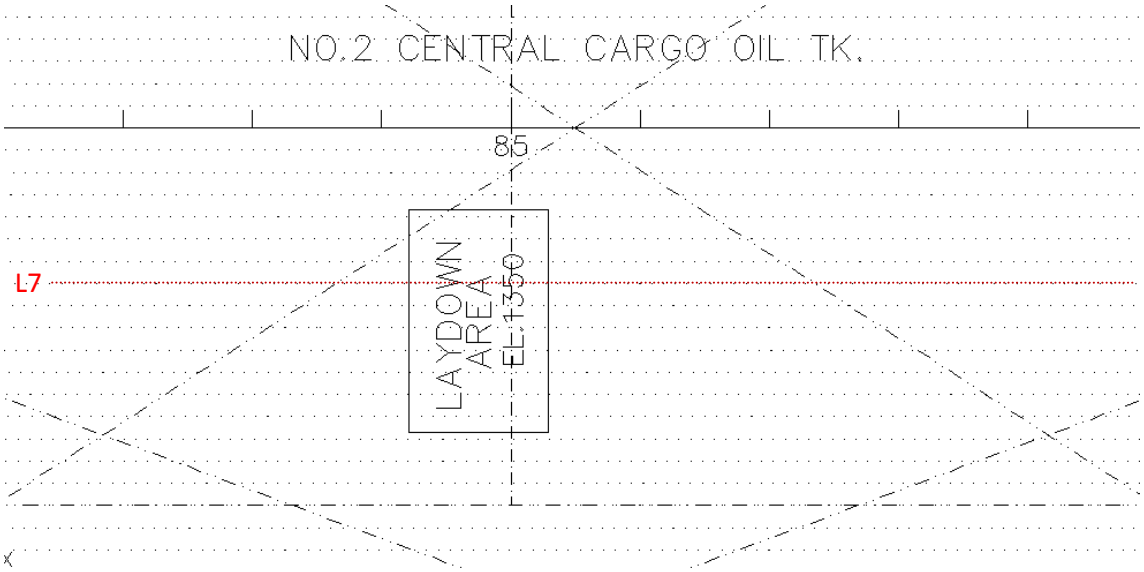


Figura 5: Estrutura do convés

A imagem seguinte apresenta a posição final do stools da laydown, alinhados com a antepara 85 e os reforços longitudinais. Observa-se a decisão de apoiar a plataforma em 6 pontos sobre o convés. Esta decisão foi influenciada pela ideia de que a utilização de seis e não quatro suportes vai contribuir para uma distribuição melhor dos esforços sobre as longitudinais do convés, afastando uma situação de inevitável troca dos perfis devido a uma concentração de tensão.

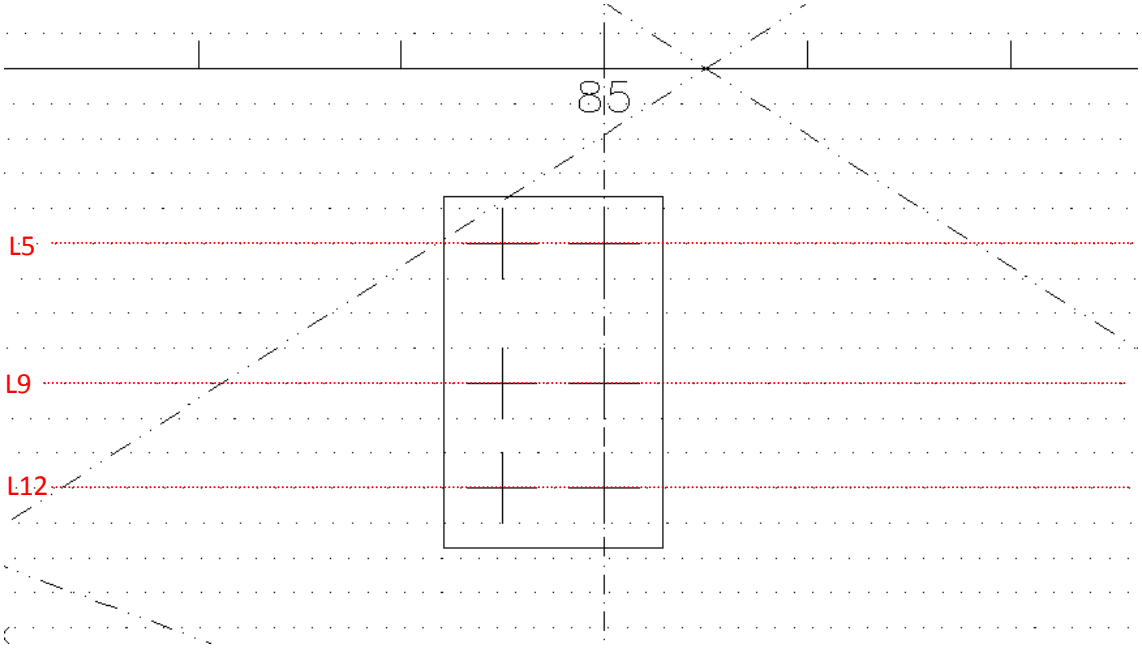


Figura 6: Posicionamento dos stools da plataforma

Com a definição do número e posicionamento dos suportes é possível então começar a avaliar e definir a estrutura do painel reforçado que comporá a laydown. Na imagem seguinte temos a posição final dos stools e as linhas tracejadas as longitudinais do convés.

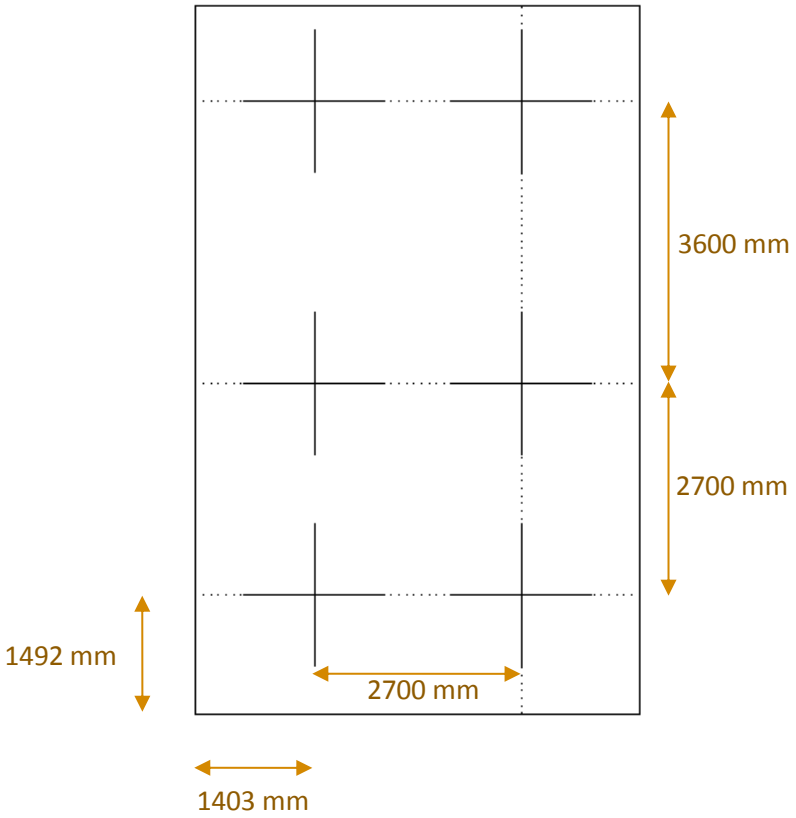


Figura 7: Posicionamento dos stools da plataforma

Abaixo temos a posição final dos suportes e dos reforços quer irão compor o painel reforçado da plataforma.

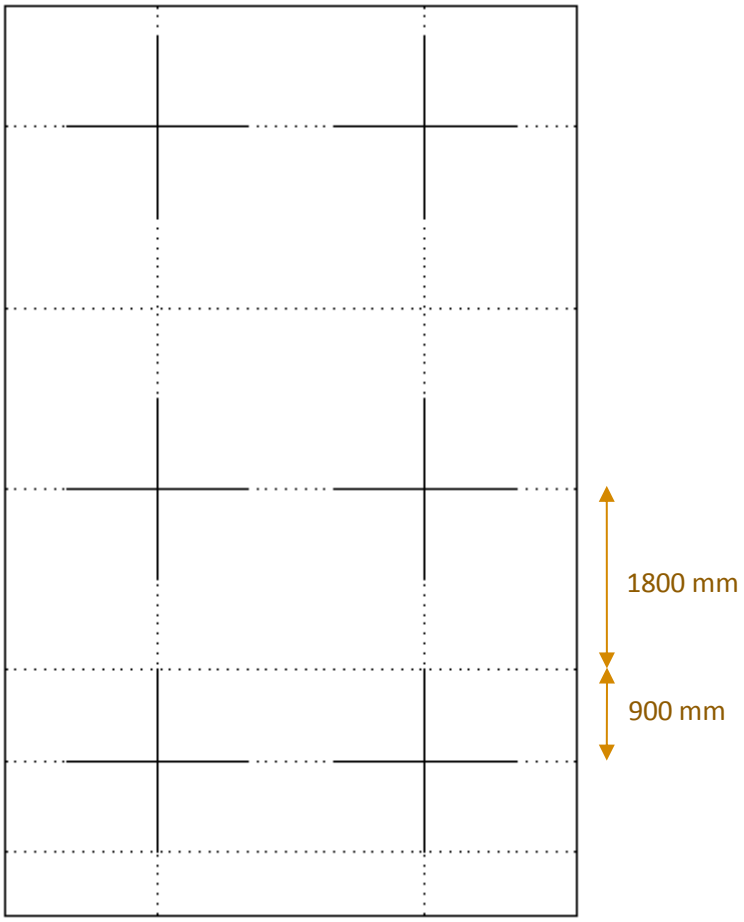


Figura 8: Reforçadores alinhados com os stools

III. Suportes

Os suportes da plataforma, chamados de *stools*, foram conceituados considerando-se não apenas a sua função, mas também como seriam construídos e acoplados ao painel da plataforma. As dimensões do stool foram definidas de acordo com a sua posição e consequentemente o espaçamento entre reforços longitudinais do convés.

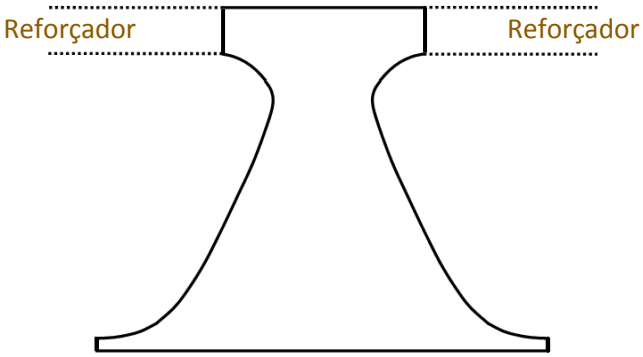


Figura 9: Perfil do stool e detalhe da conexão com o painel

4 ESTRUTURA DO NAVIO

A estrutura do navio na região de interesse pode ser observada nas duas imagens seguintes. A região modelada está delimitada nas imagens e foi definida de forma a compreender meio espaçamento de cavernas gigantes para ré da antepara 85 e meio espaçamento para vante da mesma antepara. Desta forma, garantiu-se um espaçamento onde distorções devidas às condições de contorno no modelo não irão comprometer a análise na região que está diretamente sobre influência da laydown.

I. Sicorda

Abaixo temos a sicorda posicionada na longitudinal 7 do navio. Embora esta estrutura tenha sido modelada conforme está apresentada abaixo, uma eventual retirada do trecho a ré da antepara 85 não deverá comprometer as definições adotadas para a *laydown area*, pois conforme foi comentado anteriormente, a posição dos stools da laydown não coincide com esta sicorda.

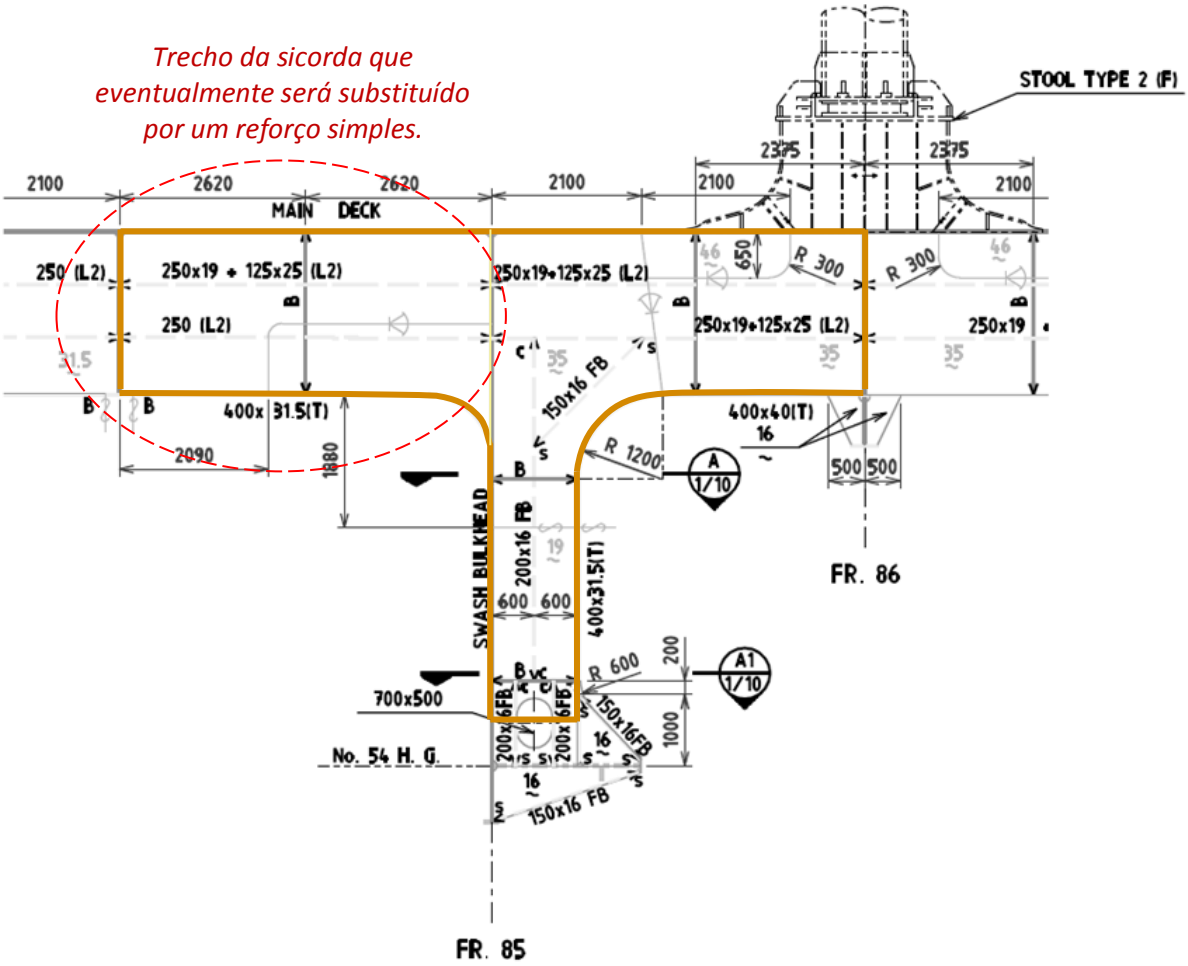


Figura 10: Sicorda

II. Antepara transversal

Abaixo temos a antepara transversal do tipo Swash e a delimitação da região que será modelada. Considerou-se a divisão de blocos como referência para definir a região modelada.

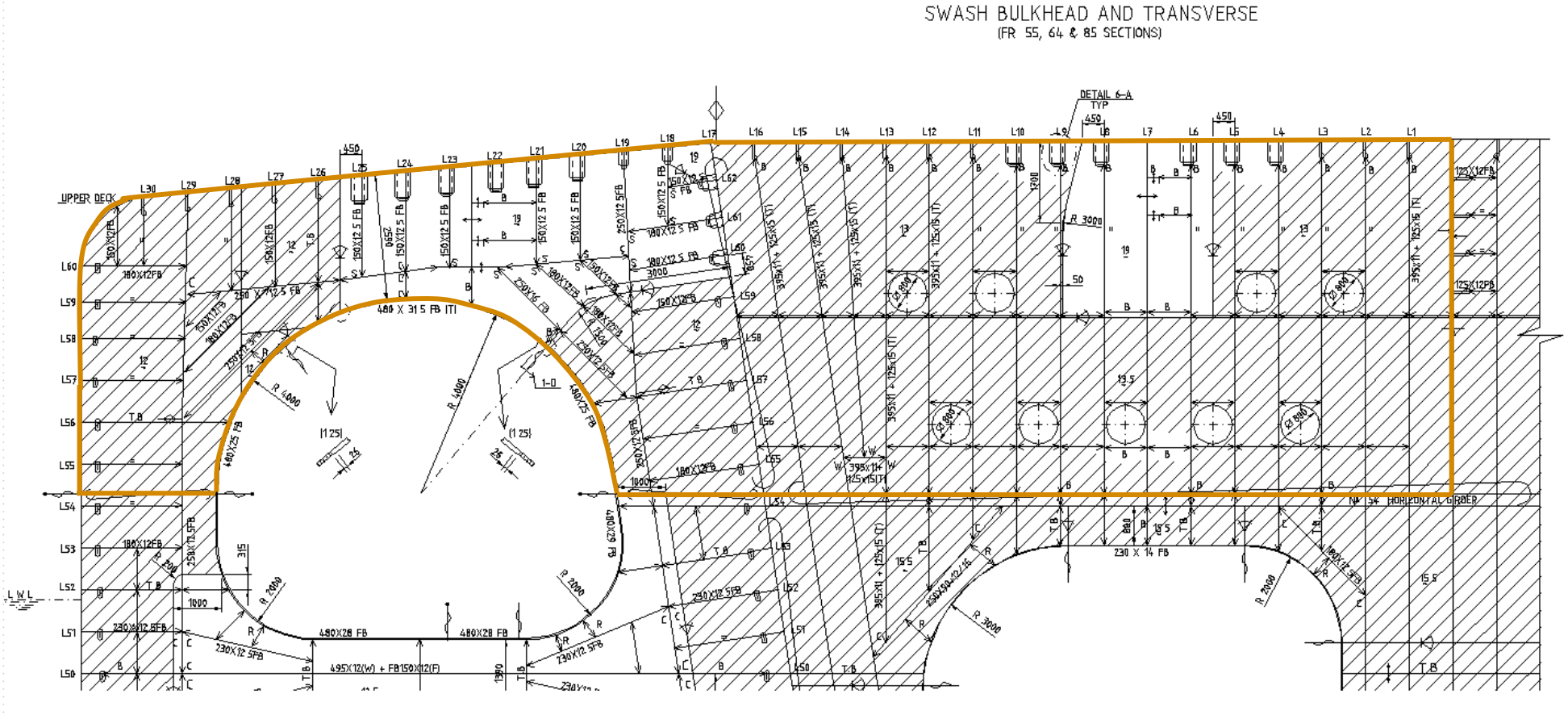


Figura 11: Antepara transversal

5 METODOLOGIA

A análise estrutural da plataforma *laydown area* avaliou três modos de falhas a qual a estrutura está sujeita, a saber, falha por escoamento do material, flambagem de painéis e fadiga da estrutura na conexão entre os suportes e o convés do FPSO. A preparação do modelo em elementos finitos e o pós-processamento das informações obtidas foi em acordo com os regulamentos e regras das sociedades classificadoras pertinentes à análise de estruturas *offshore*.

Para a análise de tensão equivalente de Von Mises, flambagem de painéis e fadiga simplificada, modelou-se em elementos finitos a estrutura da região do convés de acordo com os limites apresentados no tópico 4. A malha do modelo apresenta refinamento adequado nas regiões de interesse, com elementos de dimensão média entre 50x50mm e 200x200mm. O modelo é composto tanto por elementos de placa quanto de viga. A transição entre estes elementos foi realizada com elementos rígidos ligando os nós da placa com o nó da viga. As cargas aplicadas seguem as normas e regulamentos do setor e foram combinadas de forma a criar diversos cenários de carregamento.

I. Cenários de cargas

De acordo com a referência DNV-OS-C201 [10], a estrutura deve ser projetada para suportar as máximas condições de carga em acordo com a tabela seguinte. Observa-se na tabela as três condições de carga consideradas nesta análise e o respectivo fator de utilização permissível η_0 para cada cenário.

Tabela 1: Combinações de carga

Table C1 Load combinations		
Combination	*Description*	*Basic usage factor, η_0*
a)	static loads	0.60
b)	maximum combined static and dynamic loads	0.80
c)	accidental loads and associated static loads	1.00
d)	maximum combined operational static loads and dynamic loads from extreme environmental situations, e.g. hurricane or typhoon	1.00

Notes:

b) Represent operational and survival conditions.

c) Represent accidental conditions with low probability of occurrence such as explosions, fire, dropped objects etc.

d) Represent for units intended to stay on location during extreme weather condition, e.g. permanently moored, with a 100 year return period. For units intended to escape during extreme weather condition, e.g. not permanently moored or with disconnectable mooring system, this load combination can be omitted.

Os carregamentos e combinações realizadas estão disponíveis neste relatório em tópicos seguintes.

II. Tensão de von Mises

Quando um material é submetido a um dado carregamento, as deformações e tensões tridimensionais são desenvolvidas em várias direções. A tensão de von Mises é uma forma expressar estas tensões multidirecionadas resumidamente em uma tensão equivalente. Para o cálculo da tensão equivalente, considerou-se a tensão de membrana de cada componente da tensão de von Mises. A tensão de membrana consiste no valor médio das tensões obtidas nas duas faces de cada elemento finito que compõe o modelo. Abaixo temos a formulação para obtenção da tensão equivalente.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2}$$

Onde:

σ_x = Tensão de membrana na direção x do elemento

σ_x = Tensão de membrana na direção y do elemento

τ = Tensão de cisalhamento no plano xy do elemento

De acordo com a metodologia adotada para a análise da tensão equivalente, a aceitação dos níveis de tensão é por comparação entre as tensões calculadas para diferentes condições de carregamento com a tensão máxima permissível definida pela multiplicação do fator de utilização permissível (η_0) com o limite de escoamento máximo do material utilizado na estrutura.

III. Flambagem de paineis

A análise de flambagem do painel reforçado da laydown e dos paineis que compõem o stools foi feita de acordo com as normas da classificadora DNV. Devido à quantidade de detalhes, este relatório apresentará apenas os aspectos mais relevantes desta metodologia adotada e as considerações adotadas. O detalhamento de todo os pormenores envolvidos no cálculo fogem ao escopo deste relatório, mas estão disponíveis para verificação na referência DNV – RP C201[2].

a. Definições

O painel não reforçado pode ser tanto a alma como o flange de uma viga, ou o chapeamento entre reforços. No caso da *laydown area*, foi considerado como painel não reforçado cada uma das quatro chapas que compõe o stool, conservadoramente desconsiderando a presença do flange. A imagem seguinte apresenta um dos stools e o painel não reforçado considerado para a análise. Ressalta-se aqui que este é um painel de forma irregular, mas para fins de simplificação e adequação à norma adotou-se um equivalente retangular conforme a marcação na imagem sugere.

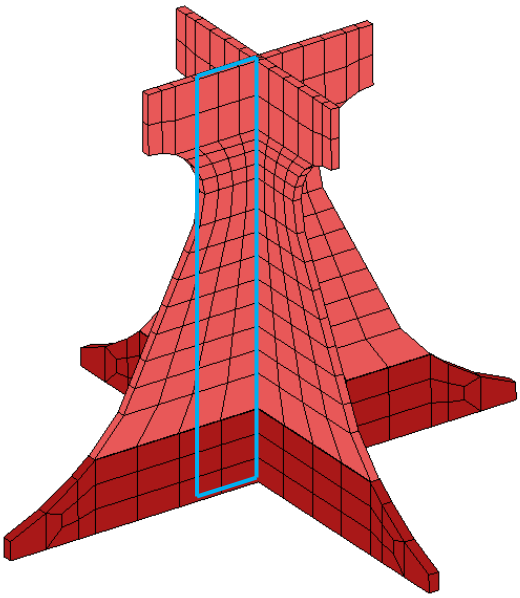


Figura 12: Painel não reforçado do stool

O painel reforçado deve possuir as características apresentadas na imagem abaixo extraída da referência DNV – RP – C201 [2]. Para que os resultados sejam considerados válidos é necessário que o valor do espaçamento em reforços (girder) l seja maior que o espaçamento entre reforçadores secundários (stiffener).

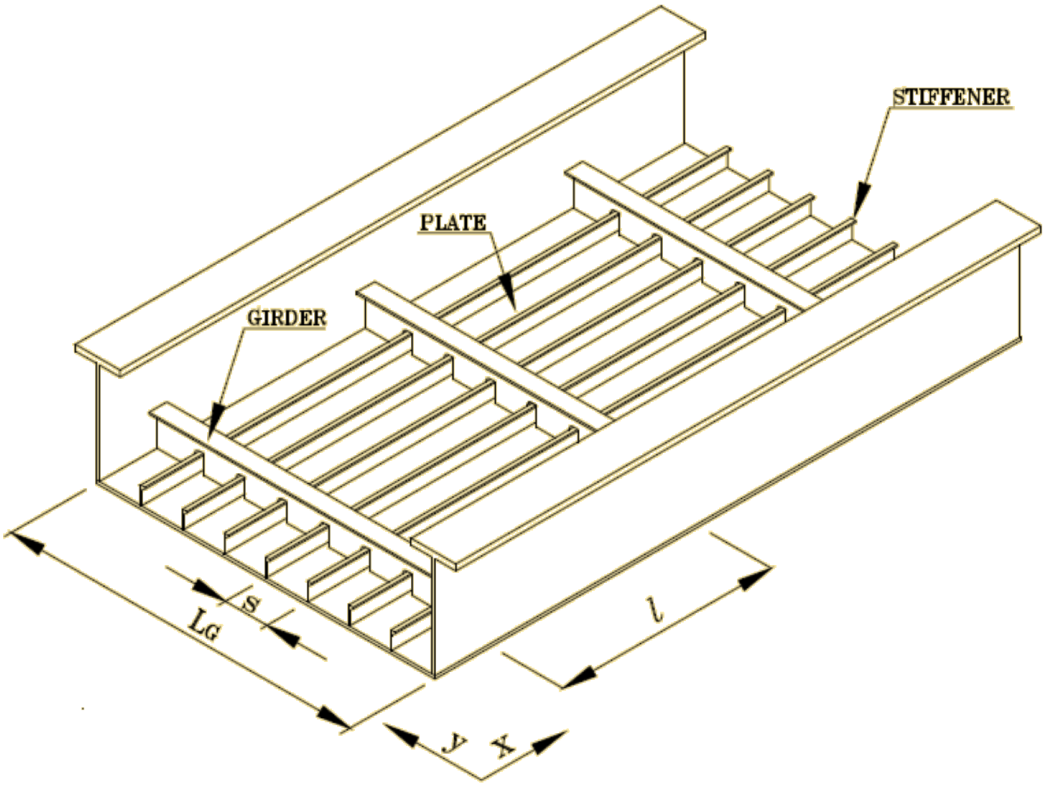


Figura 13: Características básicas de um painel reforçado

O painel reforçado que compõe a parte superior da plataforma *laydown area* possui as características explicitadas anteriormente. O painel selecionado para a verificação da flambagem deve ser aquele que está sujeito a um maior risco de flambar. Considerando a posição da plataforma laydown e o movimento que ficará submetida em decorrência do efeito de viga navio, o painel apresentado na figura 14 é, portanto o de maior vulnerabilidade. O efeito de viga navio deixa este trecho central da laydown mais sujeito à tração e compressão. Na figura 14 temos uma representação das cargas de compressão atuando no painel.

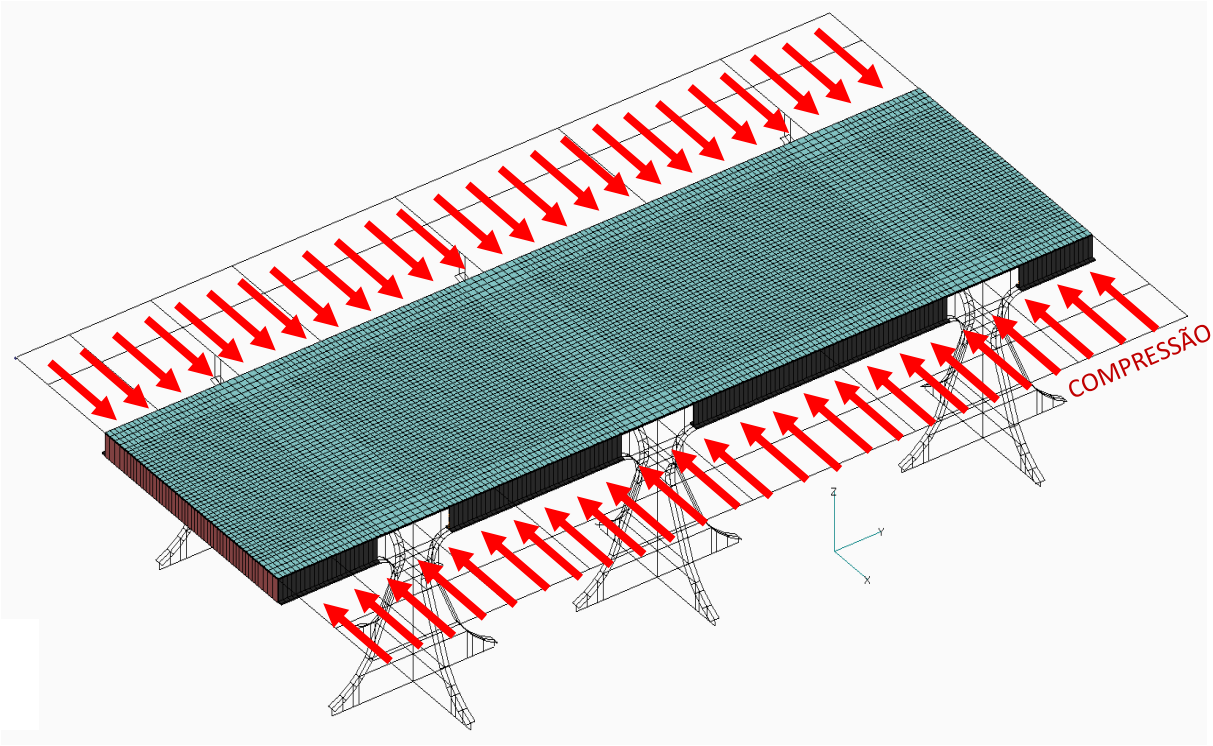


Figura 14: Painel reforçado sujeito ao maior risco de flambagem

b. Modos de falha

De acordo com a referência DNV – RP – C201 [2], os seguintes modos de falha estão cobertos pela análise de flambagem de paineis reforçadas seguindo esta metodologia.

- Escoamento de paineis sujeitos à flexão devida à carga lateral
- Flambagem de paineis devido a compressão ou cisalhamento

c. Verificação da resistência de paineis não reforçados

Abaixo temos as verificações realizadas para os paineis não reforçados de acordo com a metodologia da referência [2] DNV – RP – C201. Símbolos, nomenclaturas e pormenores de cada cálculo podem ser verificados na mesma referência citada acima em cada tópico e página citada.

- Flambagem devido a compressão longitudinal uniforme [2] Tópico 6.2, Pág. 12;

$$\sigma_{x,Sd} \leq \sigma_{x,R} = C_x \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}$$

- Flambagem devido a compressão transversal uniforme [2] Tópico 6.3, Pág. 12;

$$\sigma_{y,Sd} \leq \sigma_{y,Rd}$$

- Flambagem devido ao cisalhamento [??] Tópico 6.4, Pág. 13;

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd}$$

- Flambagem de painel sujeito a cargas de compressão, tração e cisalhamento [2] Tópico 6.5, Pág. 13;

$$\left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right)^2 - c_1\left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right)\left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Sd}}{\tau_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0$$

d. Verificação da resistência de paineis reforçados

Abaixo temos as verificações realizadas para os paineis reforçados de acordo com a metodologia da referência [2] DNV – RP – C201. Símbolos, nomenclaturas e pormenores de cada cálculo podem ser verificados na mesma referência citada acima em cada tópico e página citada.

- Flambagem da chapa entre reforçadores [2] Tópico 7.4, Pág. 18;

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M}$$

- Flambagem da chapa entre reforçadores [2] Tópico 7.4, Pág. 18;

$$\sigma_{y,Sd} \leq k_{sp}.\sigma_{y,Rd}$$

- Verificação dos reforçadores (cisalhamento) [2] Tópico 7.8, Pág. 22;

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = A_{net}\frac{f_y}{\gamma_M\sqrt{3}}$$

IV. Análise de fadiga

A metodologia de análise de fadiga explicitada na referência DNV – RP – C203 [1] é baseado nas curvas de dados chamada Curvas S-N. Estas curvas definem os valores de tensão (variação da tensão) em relação ao número de ciclos necessários para causar falha em uma determinada taxa de tensão. Esta metodologia se mostra adequada, pois as tensões atuantes nos pontos críticos são menores que a tensão de escoamento do aço utilizado, enquadrando-se assim como uma situação linear elástica (*Palmgren-Miner rule*).

A falha por fadiga é causada primariamente em decorrência das variações de carregamento e sua atuação de forma cíclica sobre a estrutura, levando a estrutura a sofrer picos máximos e mínimos de tensão de forma contínua ao longo do tempo. De acordo com a regra de Miner, o acúmulo linear de dano é obtido da seguinte forma:

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i}$$

Onde:

D = acúmulo linear de dano
n_i = número de ciclos associado a um nível de variação de tensão
N_i = número de ciclos correspondente a vida à fadiga

a. Região de interesse para análise de fadiga

A principal carga cíclica potencialmente geradora de dano por fadiga é decorrente do efeito de viga navio. Desta forma, será avaliada a conexão entre o stool da *laydown area* e o convés do FPSO.

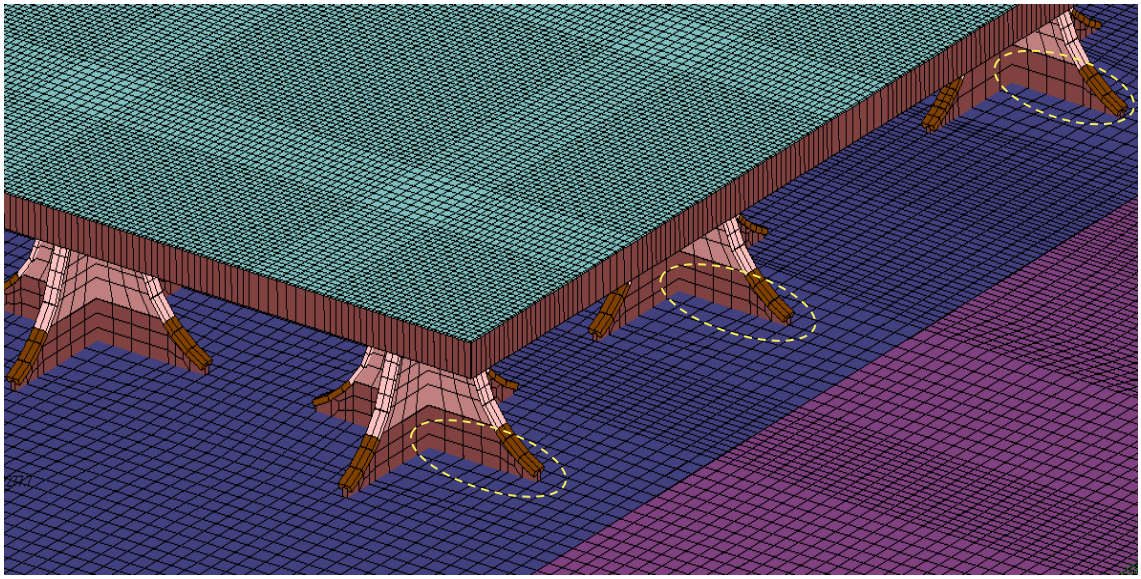


Figura 15: Regiões de análise da fadiga

b. **Definição do DFF (Design Fatigue Factor)**

A plataforma laydown faz parte do chamado topside da plataforma, que inclui a estrutura apoiada no convés. Por tratar-se de uma estrutura posicionada em uma região de fácil acesso e em caso de falha não comprometer de forma grave o restante da plataforma, o fator DFF é definido como sendo 1.

Tabela 2: Design Fatigue Factors

DESIGN FATIGUE FACTORS (DFF)

Position	Classification of structural component based on consequence of failure	Accessibility for Inspection and Repair		
		Accessible		Not Accessible (Note 3)
		Above FPSO Minimum draft	Below FPSO Minimum draft	
Hull	substantial	3	5	10
	low	2 (Note 1)	3 (Note 2)	5
Topsides	substantial	2	Not applicable	10
	low	1	Not applicable	4

c. **Carga Aplicada**

O modelo foi carregado com as cargas de condição extrema menos a aceleração da gravidade, a plataforma foi considerada completamente carregada durante toda a vida útil da plataforma. A carga cíclica aplicada foi o deslocamento prescrito devido ao efeito de viga navio. Este deslocamento foi aplicado numa condição simulando alquebramento e em outra simulando tosamento.

d. **Detalhe Estrutural**

De acordo com a tabela A-8 página 86 da referência DNV – RP – C203 APPENDIX A [1], o detalhe estrutural foi classificado como tipo 1.

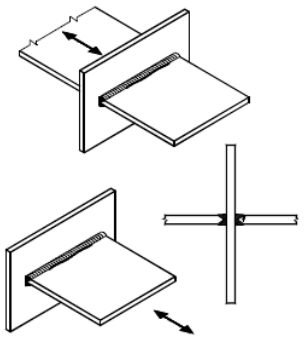
F	1. 	1.Full penetration butt welded cruciform joint	1.: — Inspected and found free from significant defects. The detail category is given for: — Edge distance ≥ 10mm — For edge distance < 10mm the detail category shall be downgraded with one SN-curve

Figura 16: Detalhe estrutural

e. **Curva S - N**

Definido o detalhe estrutural, recorre-se à tabela D-1 na página 148 da referência DNV – RP – C203 APPENDIX D [1] para a definição da curva S - N. Além disso, deve-se verificar o ângulo da tensão principal obtida, conforme a figura 17 abaixo.

Tabela 3: Design Fatigue Factors

Table D-1 Classification of details and selection of S-N curve			
Angle φ in Figure D-3	*Detail classified as F for stress direction normal to the weld*	*Detail classified as E for stress direction normal to the weld*	*S-N curve when using the hot spot stress methodology*
0 - 30	F	E	D
30 - 45	E	D	C2
45 - 60	D	C2	C2
60 - 75	C2	C2	C2*
75 - 90	C2*	C2*	C2*
* A higher S-N curve may be used in special cases. See Table A-3 for further information.			

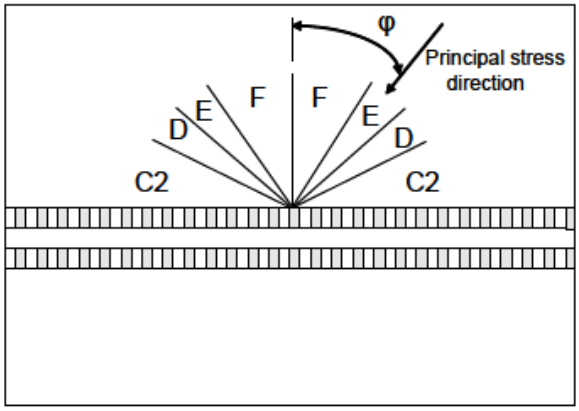


Figura 17: Ângulo da tensão principal

f. **Fator de uso**

De acordo com a tabela 5-8 página 60 da referência DNV-RP-C203 [1], para uma vida útil de 25 anos e DFF = 1, o fator de uso é de 0.80.

Tabela 4: Design Fatigue Factors

Table 5-8 Utilisation factors η as function of design life and design fatigue factor							
DFF	*Design life in years*						
	5	*10*	*15*	*20*	*25*	*30*	*50*
1	4.0	2.0	1.33	1.00	0.80	0.67	0.40
2	2.0	1.0	0.67	0.50	0.40	0.33	0.20
3	1.33	0.67	0.44	0.33	0.27	0.22	0.13
5	0.80	0.40	0.27	0.20	0.16	0.13	0.08
10	0.40	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.04

g. **Fator de redução**

Para um fator de utilização de 0.80 e parâmetro de Weibull h = 1 (Taxa de falha constante, de acordo com a referência [1]), o fator de redução é de 0,941. O fator de redução pode ser verificado na tabela 5-5 página 59 da referência DNV-RP-C203 [1].

Tabela 5: Reduction Factor

Table 5-5 Reduction factor on stress to correspond with utilisation factor η for C - W3 curves in air environment								
Fatigue damage utilisation η	*Weibull shape parameter h*							
	0.50	*0.60*	*0.70*	*0.80*	*0.90*	*1.00*	*1.10*	*1.20*
0.10	0.497	0.511	0.526	0.540	0.552	0.563	0.573	0.582
0.20	0.609	0.620	0.632	0.642	0.652	0.661	0.670	0.677
0.22	0.627	0.638	0.648	0.659	0.668	0.677	0.685	0.692
0.27	0.661	0.676	0.686	0.695	0.703	0.711	0.719	0.725
0.30	0.688	0.697	0.706	0.715	0.723	0.730	0.737	0.743
0.33	0.708	0.717	0.725	0.733	0.741	0.748	0.754	0.760
0.40	0.751	0.758	0.765	0.772	0.779	0.785	0.790	0.795
0.50	0.805	0.810	0.816	0.821	0.826	0.831	0.835	0.839
0.60	0.852	0.856	0.860	0.864	0.868	0.871	0.875	0.878
0.67	0.882	0.885	0.888	0.891	0.894	0.897	0.900	0.902
0.70	0.894	0.897	0.900	0.902	0.905	0.908	0.910	0.912
0.80	0.932	0.934	0.936	0.938	0.939	0.941	0.942	0.944
1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

h. **Correção para espessura**

Considerando a correção para a espessura que excedem 25 mm, de acordo com a referência DNV – RP – C203, Seção 2 [1], valor do expoente k é obtido em função da curva S-N definida anteriormente. A tensão permissível sofre então uma última correção.

Tabela 6: Reduction Factor

$$\sigma_{0,t} = \sigma_{0,tref}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^k \qquad (5.2.1)$$

k = thickness exponent, see section 2.4 and Table 2-1, Table 2-2 and Table 2-3

$\sigma_{0,tref}$ = allowable stress as derived from Table 5-2 and Table 5-3

Table 2-1 S-N curves in air						
S-N curve	*$N \le 10^7$ cycles*		*$N > 10^7$ cycles*	*Fatigue limit at 10^7 cycles *)*	*Thickness exponent k*	*Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)*
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF >10.0	1.00
*) see also section 2.11						

O valor limite da faixa de tensão principal permitida é obtido conforme as definições e aplicações de correções apresentadas nos tópicos b ao h.

6 MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural foi desenvolvido no programa de Femap com elementos de placa e viga. O material utilizado na plataforma laydown foi o aço especial AH36 e a estrutura do casco do FPSO possui aço AH36 e aço comum. As margens de corrosão foram aplicadas, sendo de 2,5 mm em todos os elementos localizados 1500 mm abaixo do convés e 1,5 mm para os demais elementos da estrutura.

I. Propriedades do material

A tabela seguinte apresenta as características dos dois tipos de material presente na estrutura.

Tabela 7: Propriedades dos materiais

Propriedades	Aço AH 36	Aço Comum
Material	Isotrópico	Isotrópico
Densidade	$7.85x10^{-9}$ t/mm^3	$7.85x10^{-9}$ t/mm³.
Módulo de Elasticidade	206000 N/mm^2	206000 N/mm².
Poison	0.3	0.3.
Tensão de escoamento	355 MPa.	235 MPa.

II. Sistema de unidades

O sistema de unidades adotado está em conformidade com o sistema internacional de unidades (SI). Múltiplos e submúltiplos serão utilizados de forma conveniente para expressar os resultados.

Tabela 8: Sistema de unidades

Unidade	Nome	Símbolo
Comprimento	Milímetro	mm
Massa	ton	t
Tempo	Segundo	s
Temperatura	Celsius	oc
Área	Milímetros quadrados	Mm2
Volume	Milímetros cúbicos	mm³
Velocidade	Milímetros por segundo	mm/s
Aceleração	Milímetros por segundo quadrado	mm/s²
Densidade	Tonelada por milímetro cúbico	t/mm³
Volume Específico	Milímetro cúbico por tonelada	mm³/ton
Ângulo	radianos	rad
Força	Newton	N
Pressão	Pascal	MPa

III. Sistema de coordenadas

O sistema de coordenadas utilizado no modelo está descrito abaixo:

- Eixo X: Longitudinal, ré para vante;
- Eixo Y: Transversal, linha centro para bombordo;
- Eixo Z: Vertical, linha de base para convés.

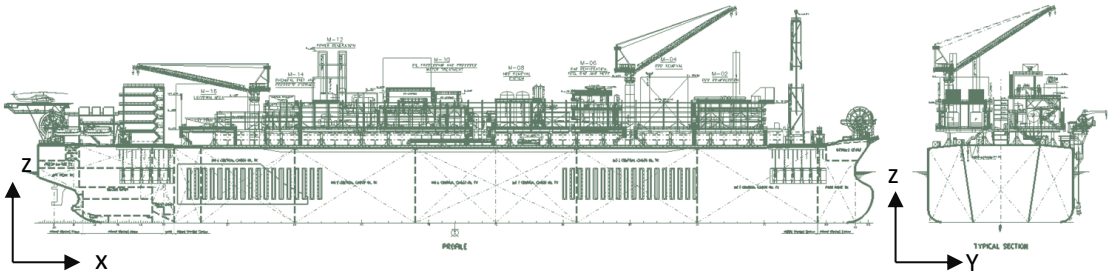


Figura 18: Sistema de coordenadas

IV. Geometria do modelo

As imagens seguintes apresentam a malha da estrutura modelada, incluindo casco do FPSO e plataforma laydown. Cada uma das cores presente no modelo refere-se a uma espessura diferente. Detalhes de cada uma das propriedades pode ser verificado no anexo 1 deste relatório.

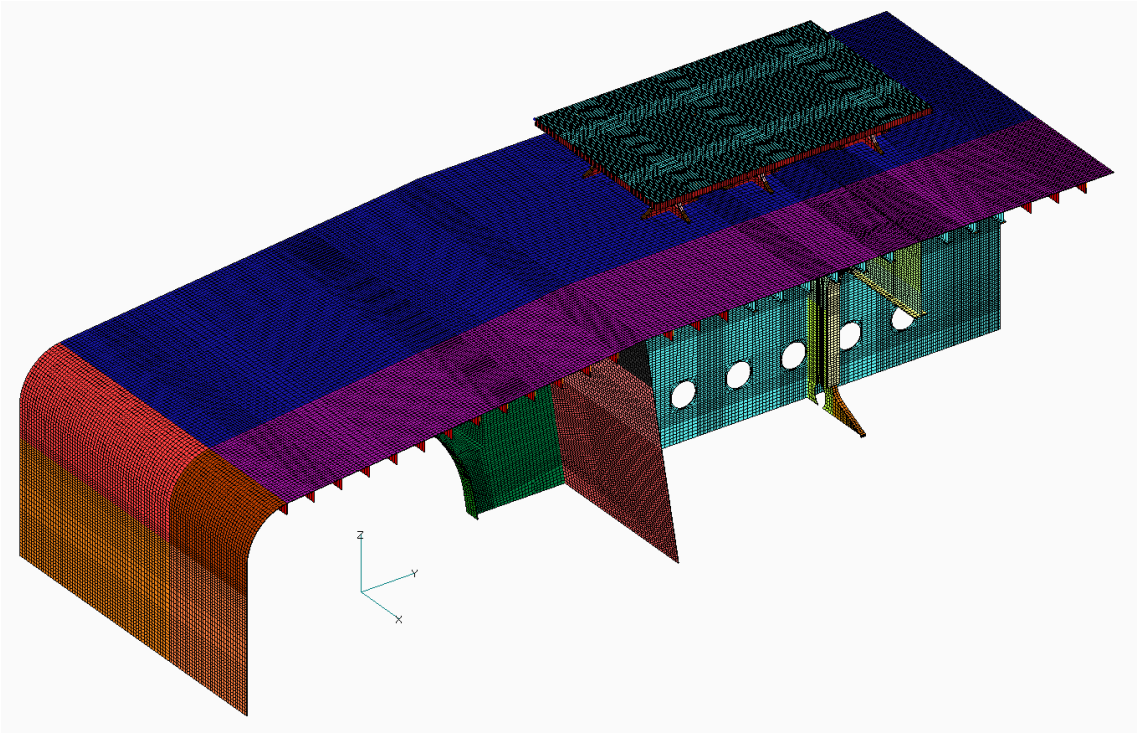


Figura 19: Visão geral do modelo

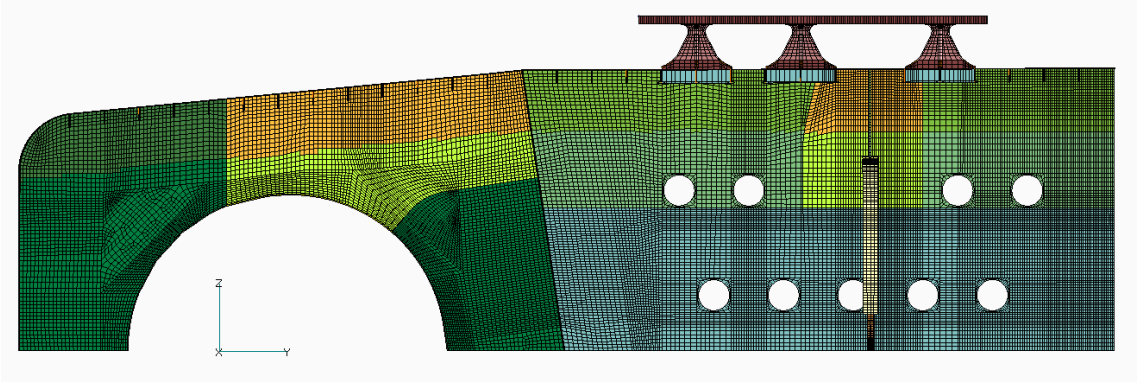


Figura 20: Vista frontal do modelo

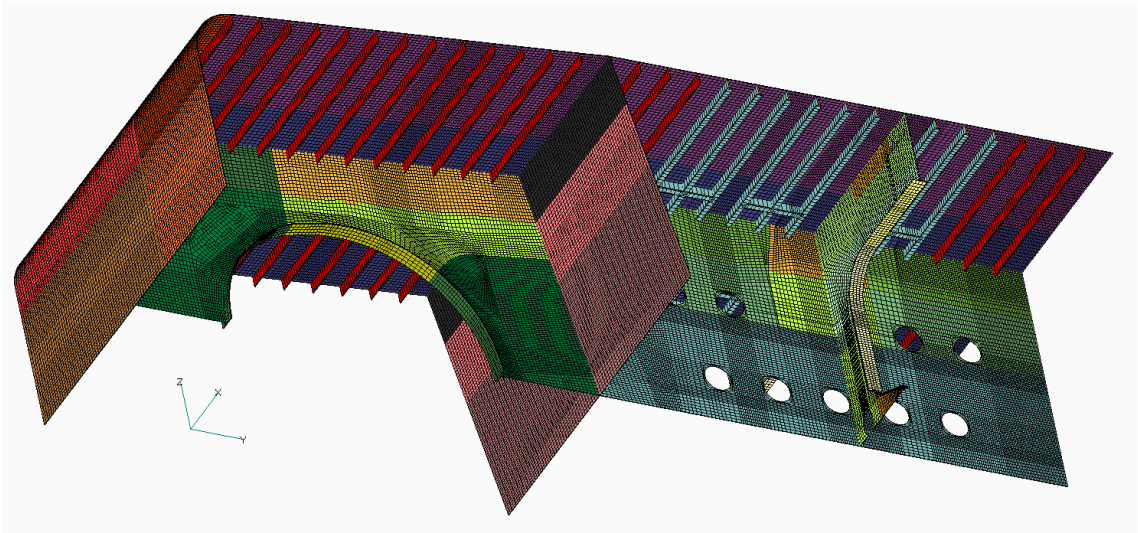


Figura 21: Visão geral

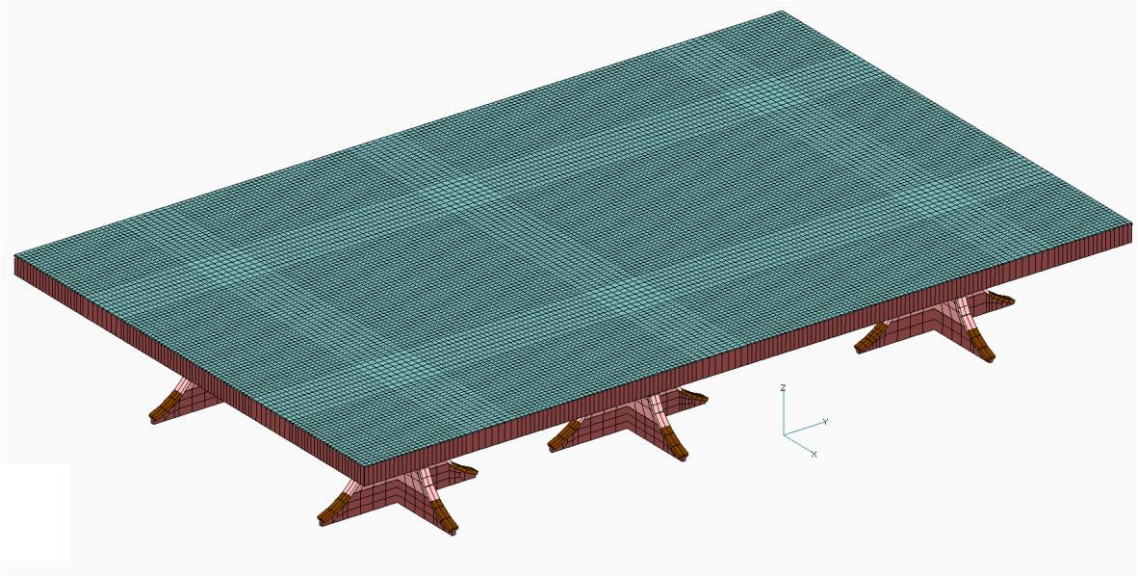


Figura 22: Visão geral superior da *laydown area*

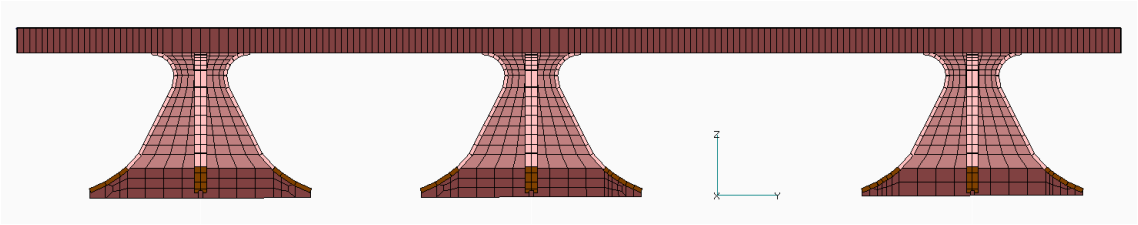


Figura 23: Vista YZ

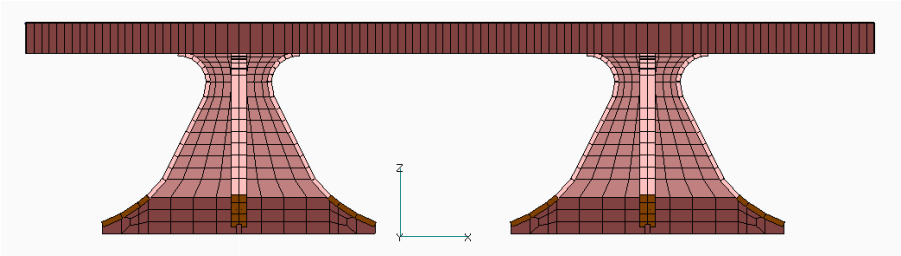


Figura 24: Vista XZ

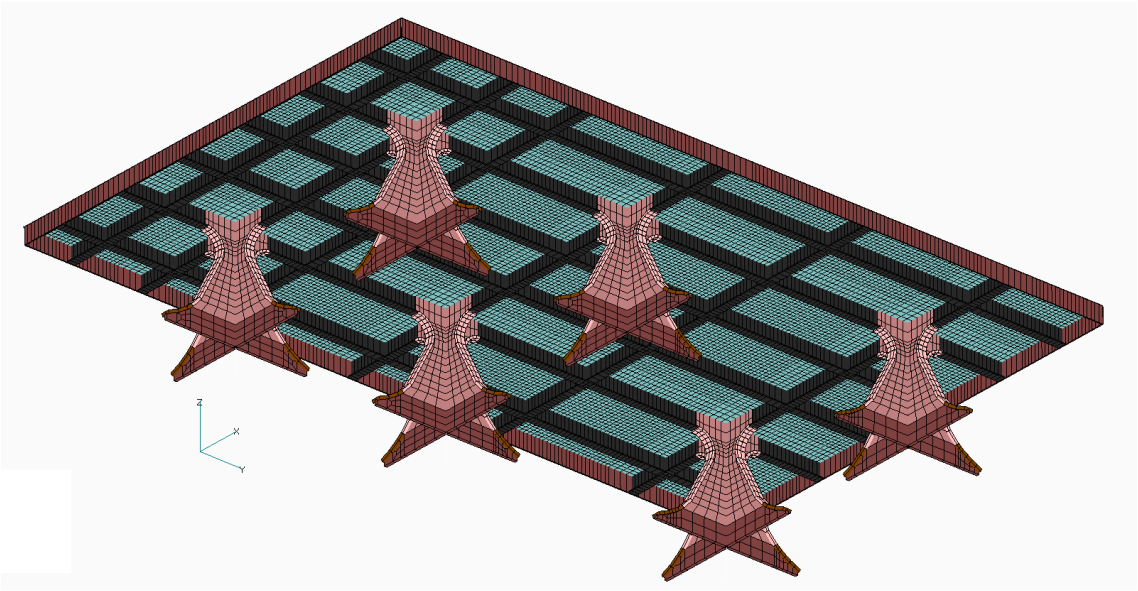


Figura 25: Visão geral inferior da *laydown area*

V. Região de análise do modelo

Com objetivo de avaliar apenas a região de interesse e evitar distorções devidas às condições de contorno, os resultados próximos às extremidades e entre o costado e a antepara longitudinal de boreste foram desconsiderados.

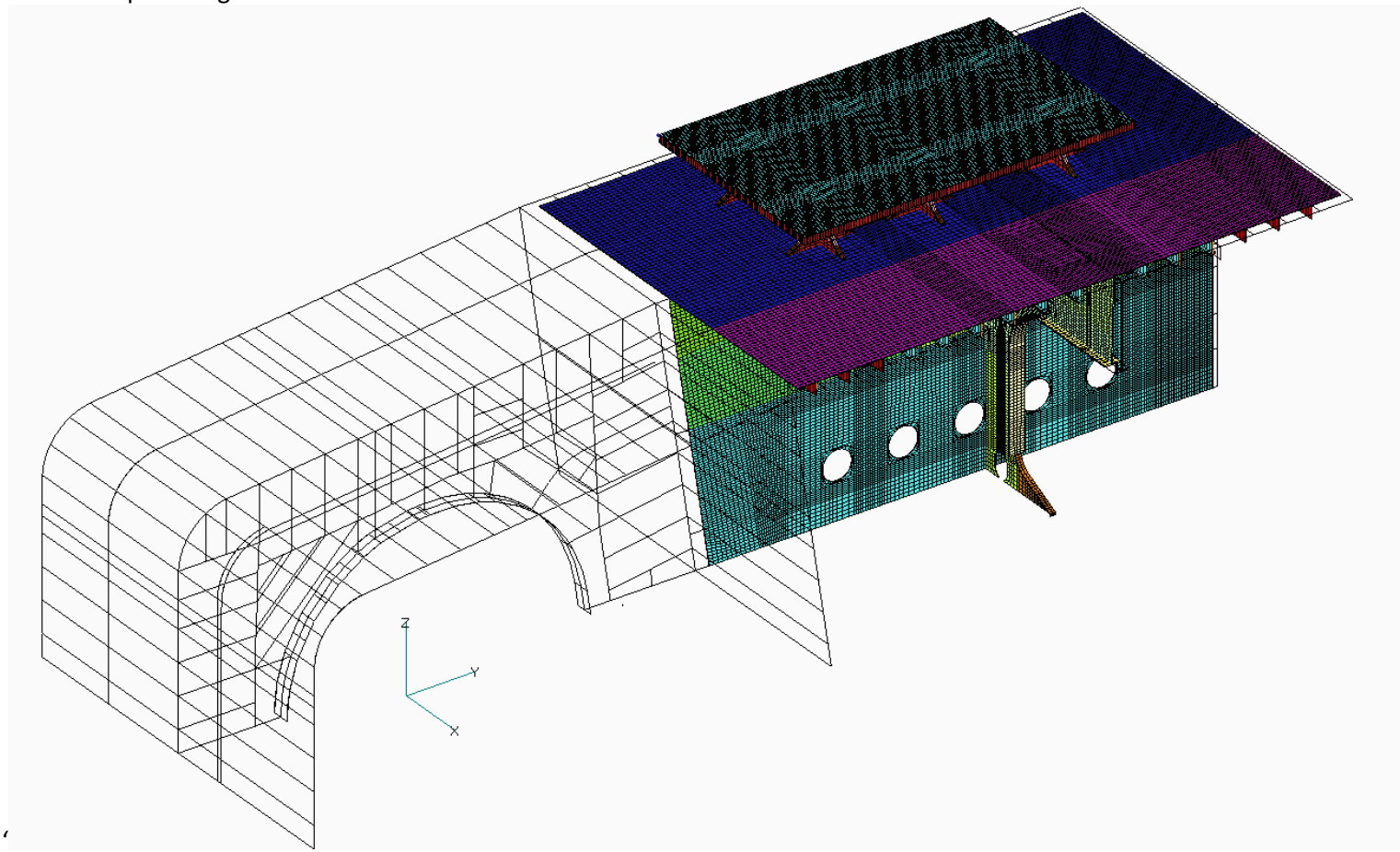


Figura 26: Região de análise do modelo

VI. Condições de contorno

As condições de contorno foram aplicadas com objetivo de simular da melhor forma possível a condição real. Estas condições foram aplicadas conforme descrito a seguir:

- Extremidades do modelo: As extremidades marcadas em vermelho na figura 27 foram consideradas engastadas, condição necessária para aplicação do deslocamento prescrito simulando o efeito de viga-navio.

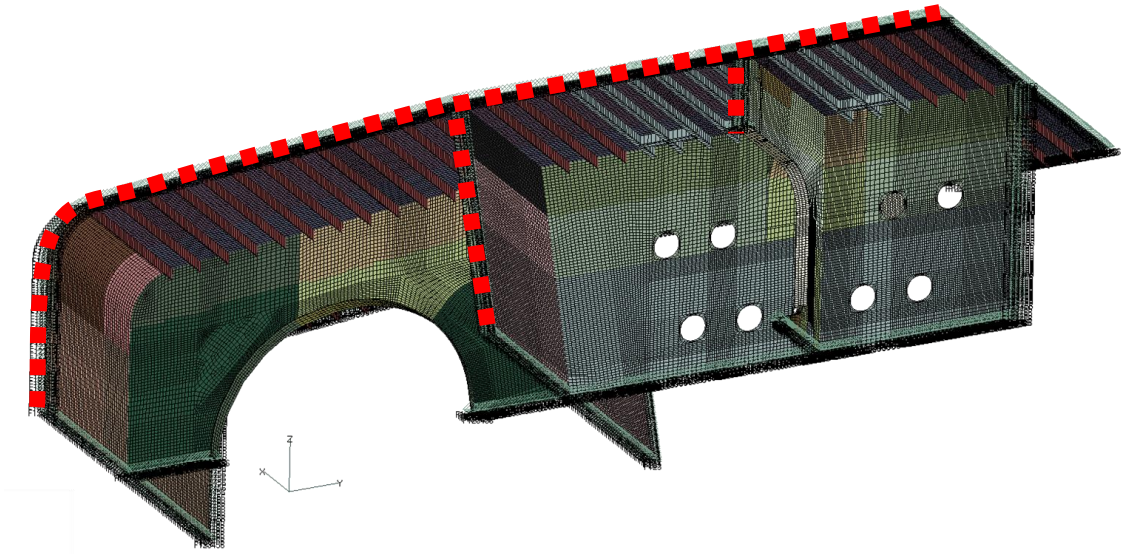


Figura 27: Condição de contorno

- As extremidades marcadas em verde na figura 28 tiveram o deslocamento no eixo z liberado, permitindo que o modelo deforme de forma coerente com o tosamento e alquebramento que se pretende simular.

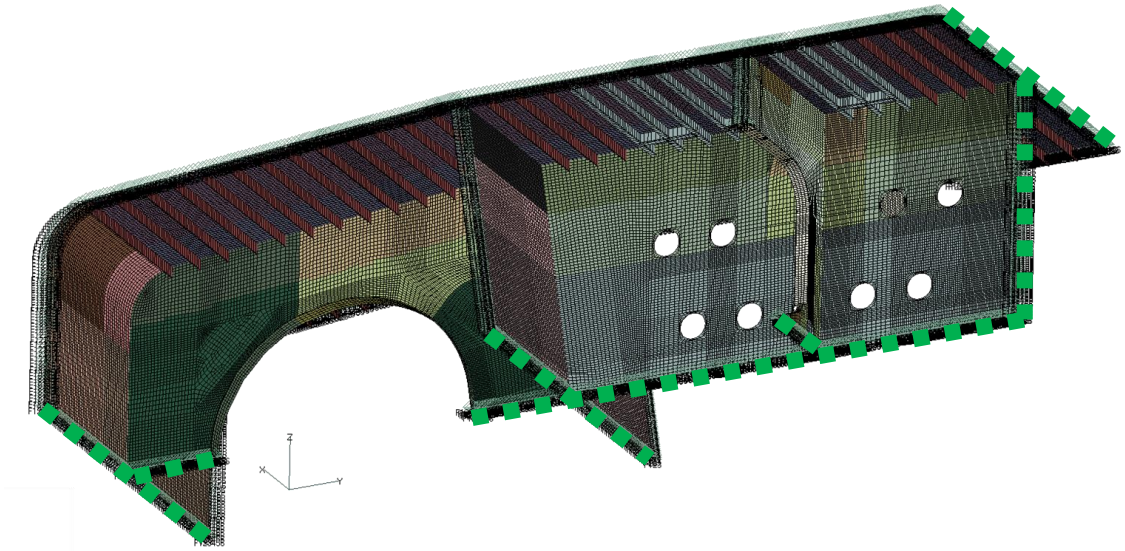


Figura 28: Condição de contorno

7 CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

De acordo com a referência DNV – OS – C102 [3], a análise estrutural deve avaliar as seguintes condições de carregamento.

- Condição Estática (SC): Considerado peso próprio da estrutura, efeito de viga-navio, vento, ondas e outros não são considerados.
- Condição de operação (DOC): Nesta condição acelerações devido ao movimento do navio (período: 1 ano), efeito de viga-navio e cargas sobre a plataforma são consideradas.
- Condição Extrema (DEC): Nesta condição é considerado acelerações devido ao movimento do navio (período: 100 anos), efeito de viga-navio e cargas sobre a plataforma.

I. Acelerações

As acelerações consideradas para as condições de operação e extrema podem ser verificadas na tabela seguinte.

Tabela 9: Acelerações

DOC	x(mm/s²)	y(mm/s²)	z(mm/s²)
Aceleração	230	740	1100
DEC	x(mm/s²)	y(mm/s²)	z(mm/s²)
Aceleração	520	1160	1890

II. Carga na plataforma *Laydown*

A carga aplicada na plataforma possui valor de 25 kN/m^2 está de acordo com o peso típico dos equipamentos que irá suportar. O valor aplicado segue as instruções típicas para este tipo de estrutura, conforme pode ser verificado na tabela seguinte.

Tabela 10: Carga aplicada na plataforma

Area	Local Design		Primary Design	Global Design
	Distributed Load (kN/m^2)	Point Load (kN) (Note 2)	Distributed Load (kN/m^2)	Distributed Load (kN/m^2)
Storage	q=max(γH,13)	1.50 q	q	q
Lay-down	25.0	25.0	15.0	15.0
Lifeboat platforms	9.0	9.0	9.0	may be ignored
Area between equipment	5.0	5.0	5.0	may be ignored
Walkways, staircases and platforms	4.0	4.0	4.0	may be ignored
Escape routes & walkways and staircases for inspection only	3.0	3.0	3.0	may be ignored
Utilities (Note 1)	7.5	7.5	may be ignored	may be ignored
Accommodation	4.0	4.0	4.0	may be ignored
Store room and workshop	15.0	15.0	15.0	may be ignored
Helideck	2.0	P (Note 3)	2.0	may be ignored
Roofs	2.5	2.5	2.5	may be ignored

Abaixo temos a carga de pressão aplicada em cada elemento do chapeamento da parte superior da estrutura.

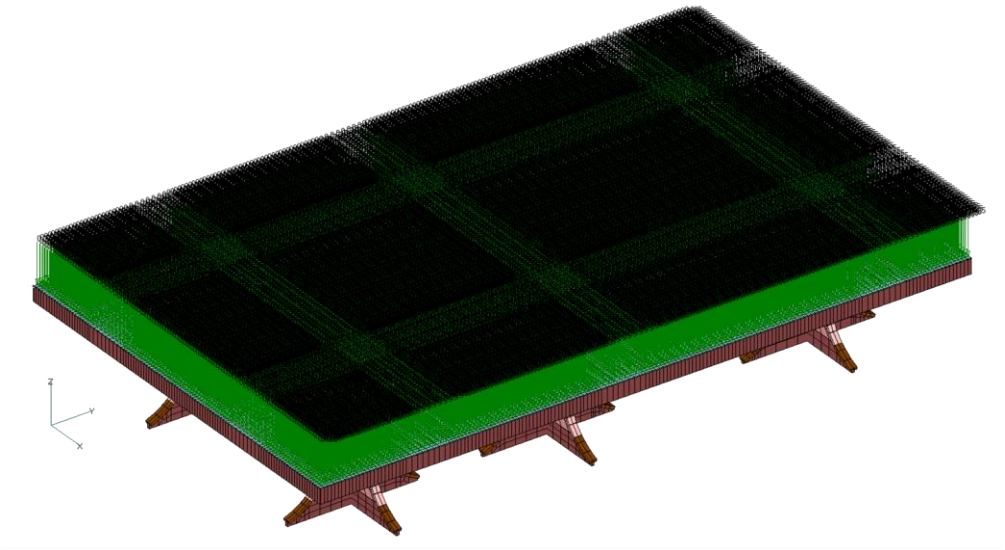


Figura 29: Carga aplicada na *laydown area*

III. Efeito de viga-navio (deslocamento prescrito)

Devido à localização longitudinal da plataforma no navio, o efeito de viga navio deve ser considerado na análise da estrutura. Considerando o navio como uma viga, podemos verificar que a deflexão desta viga comprime e traciona a estrutura navio, especialmente no corpo paralelo. Para esta análise será considerado o efeito em decorrência da ação de ondas.

- Alquebramento: Nesta situação o navio apresenta uma deformação com concavidade voltada para baixo. Há uma tração no convés e uma compressão do fundo.

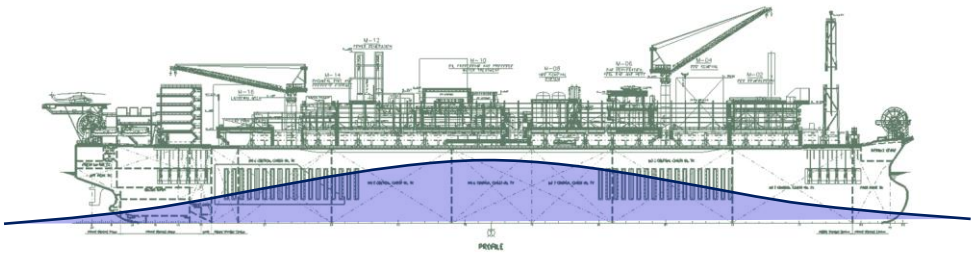


Figura 30: Efeito de onda

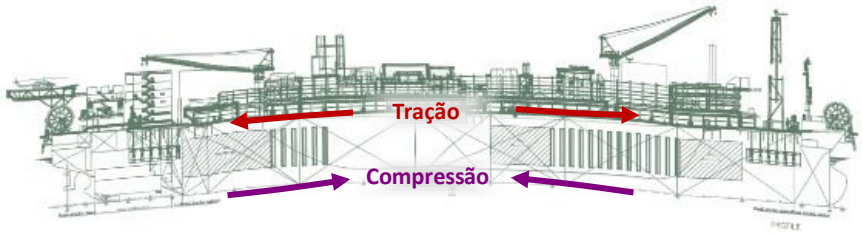


Figura 31: Alquebramento

- Tosamento: Nesta situação o navio apresenta uma deformação com concavidade voltada para cima. Há uma compressão no convés e uma tração do fundo.

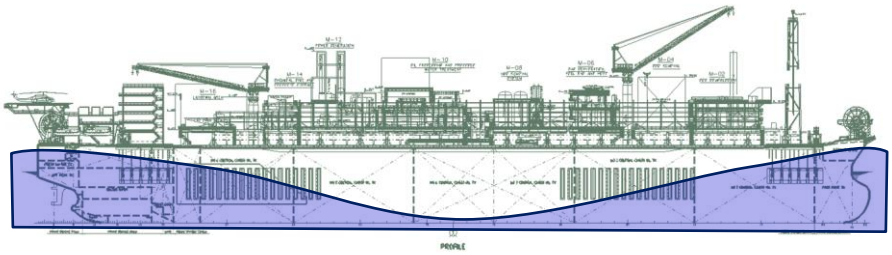


Figura 32: Efeito de onda

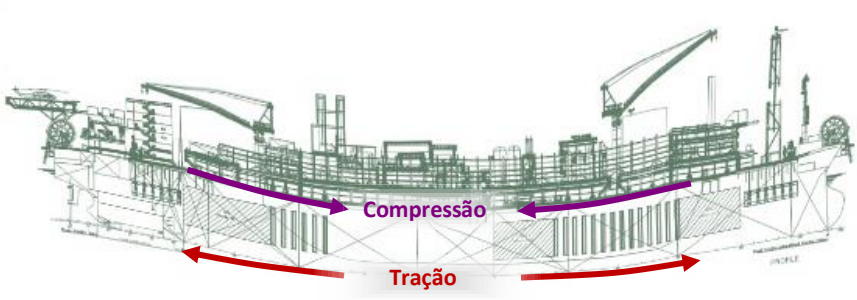


Figura 33: Tosamento

A simulação da deformação do casco foi feita de acordo com a referência DNV – Offshore Standard – C102 página 36 [3]. O momento fletor em alquebramento, tosamento e em águas calmas foi obtido da mesma referência acima citada. Além disso, de acordo com a referência DNV – Rules for Ships [4] um fator de redução de 0.8 nos momentos de onda devido à posição longitudinal da plataforma. A simulação segue a seguinte formulação:

$$\delta = \left(\frac{0.5(M_1 + M_2)}{ZE}\right) l$$

Onde:
δ = Deformação longitudinal entre as seções 1 e 2;
M = Momento (somatório dos momentos);
Z = Módulo de seção na interface do convés com o topside;
E = Módulo de elasticidade;
l = Distância entre as seções 1 e 2.

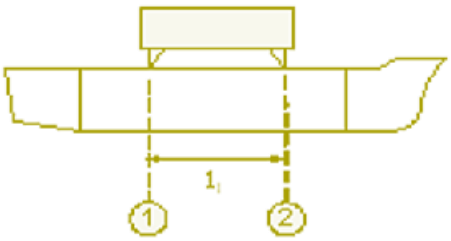


Figura 34: Simulação do efeito de viga-navio

Após calcular o valor do deslocamento δ, este carregamento foi aplicado no modelo conforme as imagens ilustrativas seguintes. Os valores calculados para os momentos podem ser verificados na tabela seguinte.

Tabela 11: Momentos fletor

Momento	Valor	Unidade
$M_{TOSAMENTO}$	7252925,6	kN.m
$M_{ALQUEBRAMENTO}$	7614520,8	kN.m
M_{SW}	540000,0	kN.m

Deslocamento simulando o alquebramento. O valor varia verticalmente entre 2,3 mm e 3,8 mm e isto foi feito utilizando as ferramentas presentes no programa utilizado.

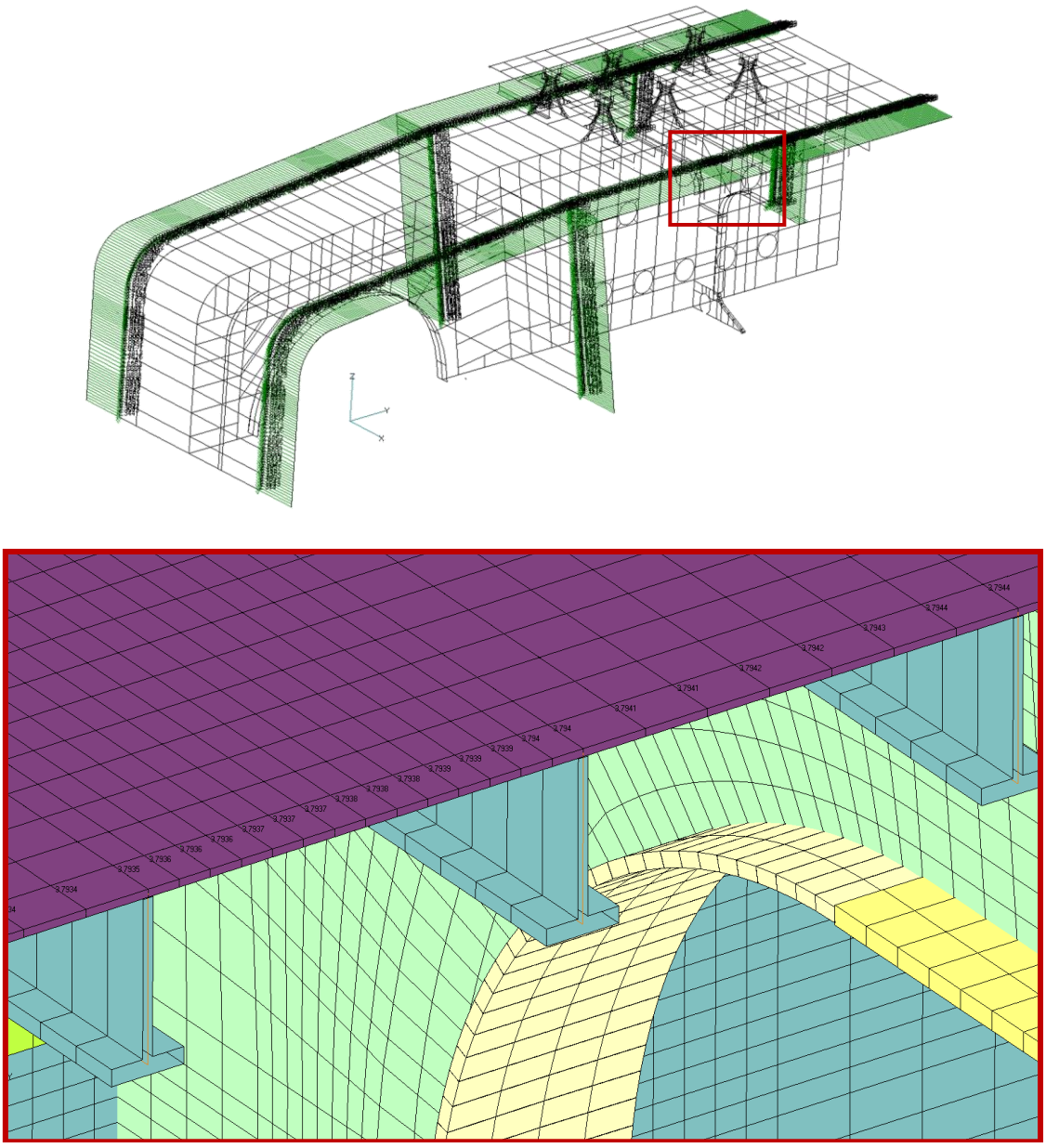
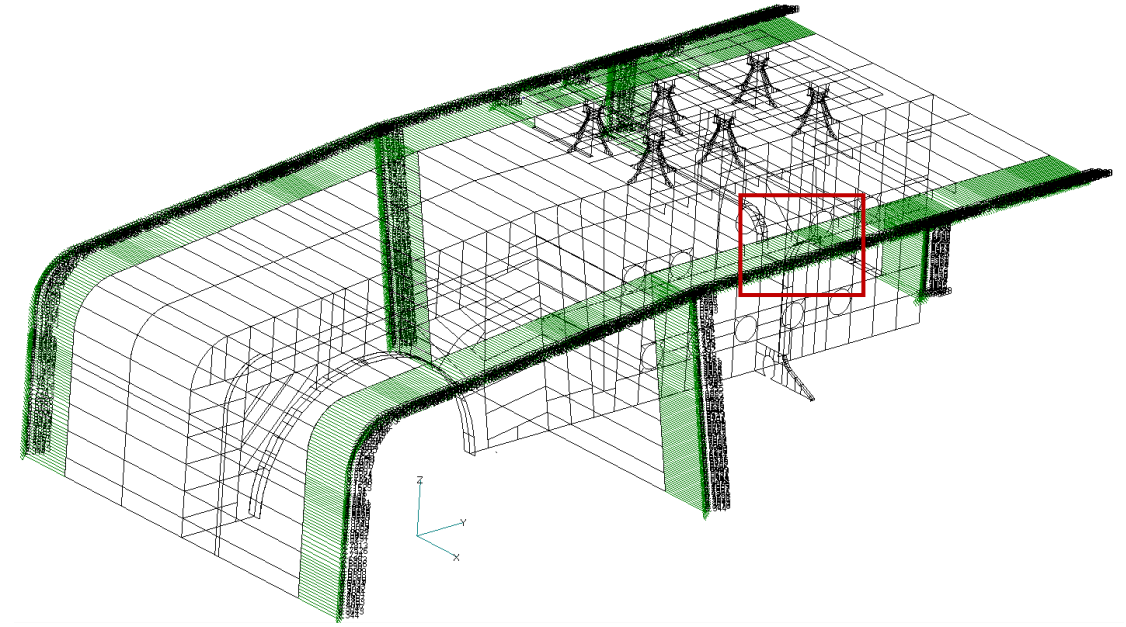


Figura 35: Deslocamento prescrito (alquebramento)

Deslocamento simulando o tosamento. O valor varia verticalmente entre 2,33mm e 3,78 mm e isto foi feito utilizando as ferramentas presentes no programa utilizado.



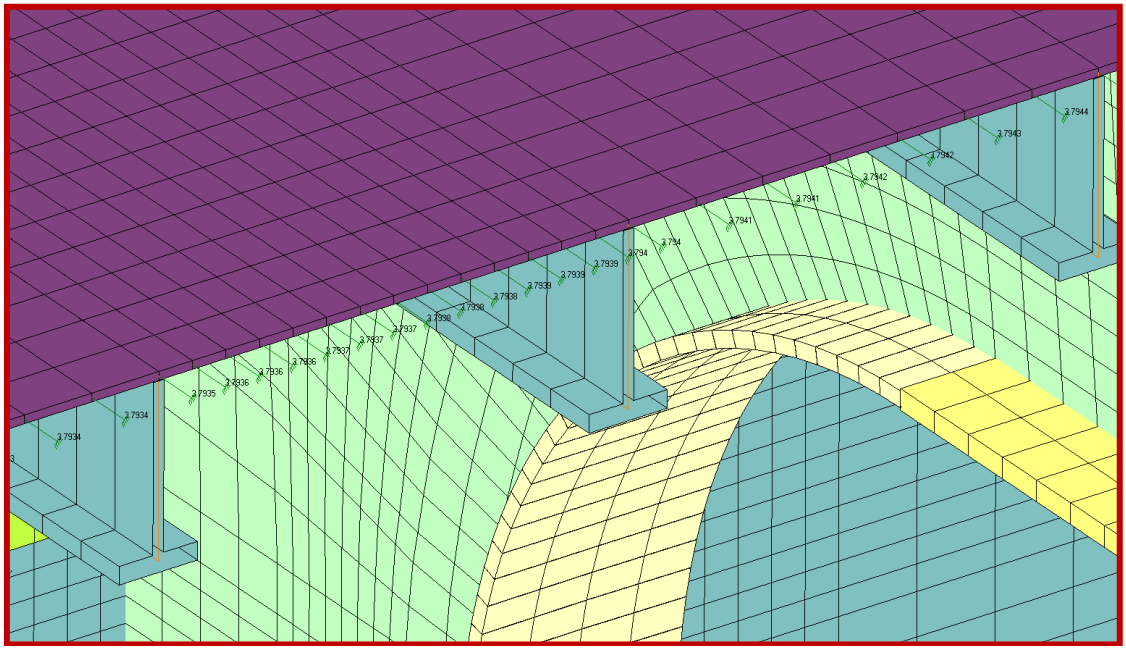


Figura 36: Deslocamento prescrito (tosamento)

IV. Combinações de carregamentos

Todas as cargas apresentadas foram combinadas de forma a gerar os diversos cenários de carregamento que a estrutura sofre. Ressalta-se que há, obviamente, diversas outras cargas atuando na estrutura e esta análise não as considera. As cargas aqui consideradas são aquelas de maior relevância para a avaliação da estrutura em questão.

Tabela 12: Combinações de cargas

Casos	Acelerações					Carga Laydown	Deslocamento		
	X+	X-	Y+	Y-	Z-		TOS	ALQ	
1					x	x			Estático
2	x		x		x	x	x		DOC
3	x			x	x	x	x		
4		x	x		x	x	x		
5		x		x	x	x	x		
6	x		x		x	x		x	
7	x			x	x	x		x	
8		x	x		x	x		x	
9		x		x	x	x		x	
10	x		x		x	x	x		DEC
11	x			x	x	x	x		
12		x	x		x	x	x		
13		x		x	x	x	x		
14	x		x		x	x		x	
15	x			x	x	x		x	
16		x	x		x	x		x	
17		x		x	x	x		x	

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados para tensão obtidos para o modelo mostraram-se dentro dos limites máximos permitidos pela classificadora Det Norske Veritas. Os valores máximos permitidos estão de acordo com o cenário de cargas considerado.

- CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - DOC

Aço Comum = 235 MPa * **Fator De Uso** = 235***0,6** = 141 MPa
Aço AH36 = 355 Mpa * **Fator De Uso** = 355***0,6** = 213 MPa

- CONDIÇÃO EXTREMA - DEC

Aço Comum = 235 MPa * **Fator De Uso** = 235***0,8** = 188 MPa
Aço AH36 = 355 Mpa * **Fator De Uso** = 355***0,8** = 284 MPa

No entanto, o fato de a estrutura apresentar valores de tensão dentro dos limites de tensão máximos permissíveis não exime o projetista de uma avaliação detalhada destes resultados. Valores expressivamente abaixo dos limites indicam uma estrutura superdimensionada, levando a um uso excessivo de aço e aumentando desnecessariamente o peso a bordo da unidade de exploração. Portanto, serão apresentados alguns dos resultados e breves comentários acerca destes dados nesta seção.

I. Análise da Tensão Equivalente

- Stools

Abaixo temos o resultado de tensão para a primeira versão do stool avaliada. Observa-se que a região de maior concentração de tensão está, conforme esperado, na região mais próxima da conexão com o convés. Os limites observados não ultrapassam o permissível de acordo com os limites já citados. Contudo, há uma grande região do stool com baixos valores de tensão e isto sugere uma avaliação da aplicação de um chapeamento mais fino nessa área e assim uma redução de peso da estrutura.

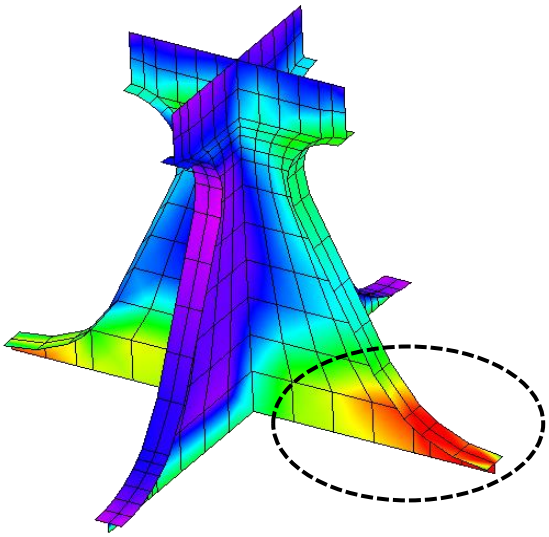


Figura 37: Versão inicial do stool

Desta forma, foi avaliada uma alteração do chapeamento do stool, criando uma faixa com espessura maior na base e outra menor acima. Ressalta-se que esta avaliação considerou também o a flambagem do painel e a fadiga. Além disso, a decisão de dividir em partes com espessuras distintas atende a necessidade de diminuir o peso da estrutura, mas o lado negativo encontra-se na necessidade de utilizar mais solda. Abaixo temos esta versão final do stool com as alterações feitas.

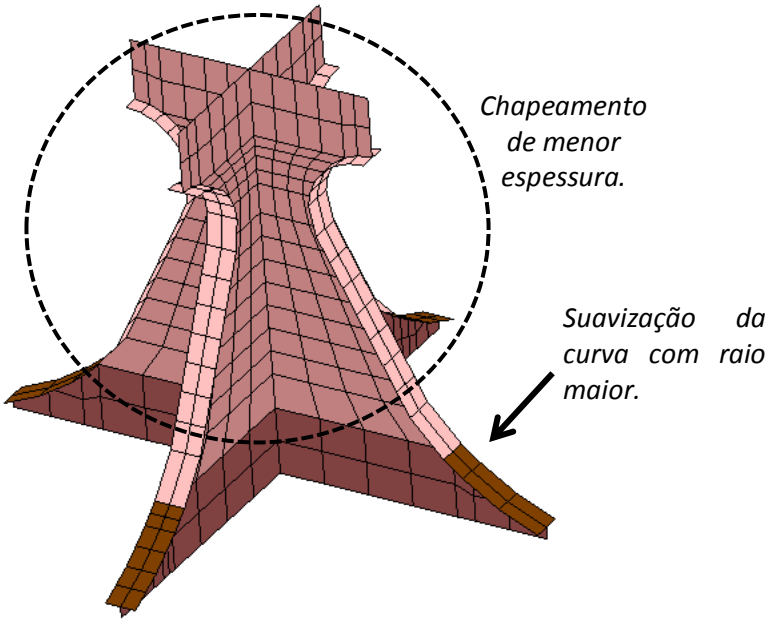


Figura 38: Versão alterada do stool

Após as alterações apresentadas acima, o a estrutura apresentou os resultados dentro do **limite máximo de 188 MPa**, sendo o máximo **obtido de 181,31 MPa**. Ressalta-se uma melhora na distribuição da tensão em decorrência da suavização da curva na base do stool, conforme apresentado acima.

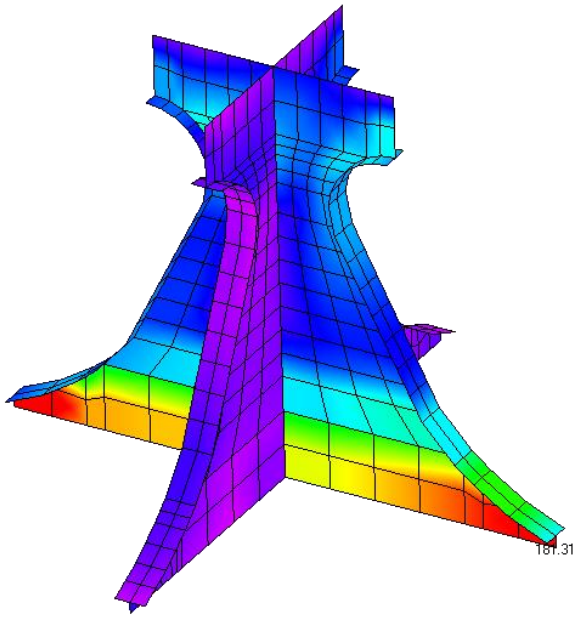


Figura 39: Von Mises para a nova versão do stool na condição DEC

- Reforçamento do Convés

O convés necessitou de reforços especificamente nas longitudinais, com inclusão de flange nos reforços longitudinais abaixo dos stools e reforços transversais para evitar a formação de *pontos duros.*

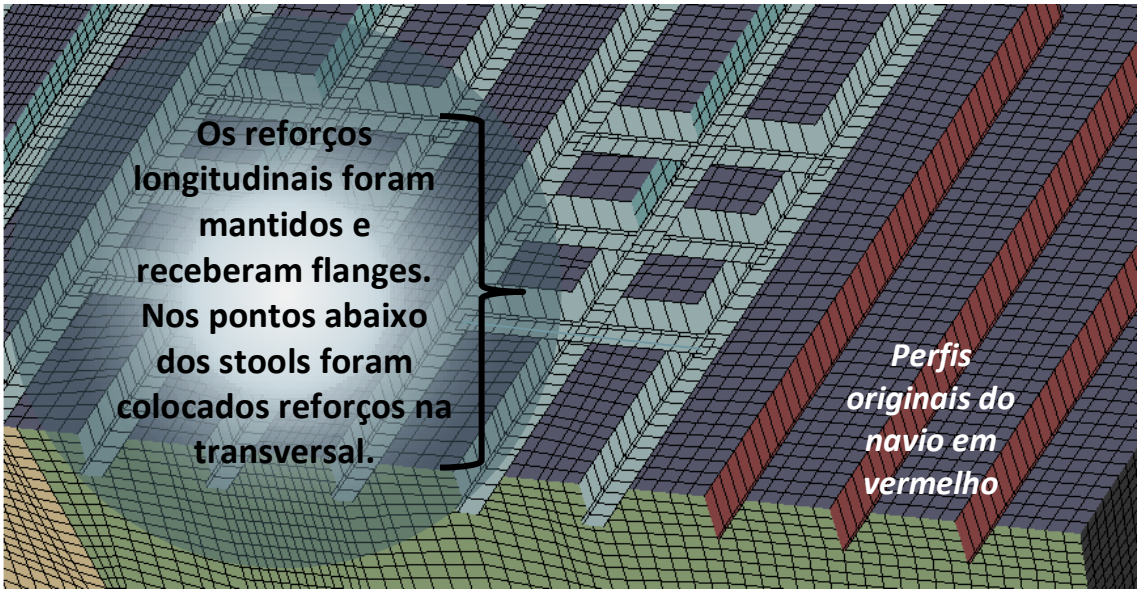


Figura 40: Reforçamento do convés

- Painel da *laydown area*

O comportamento do painel da laydown area seguiu o esperado, com maiores tensões observadas na região de conexão entre os elementos de viga e de placa e também no trecho em que o distanciamento entre os stools é maior.

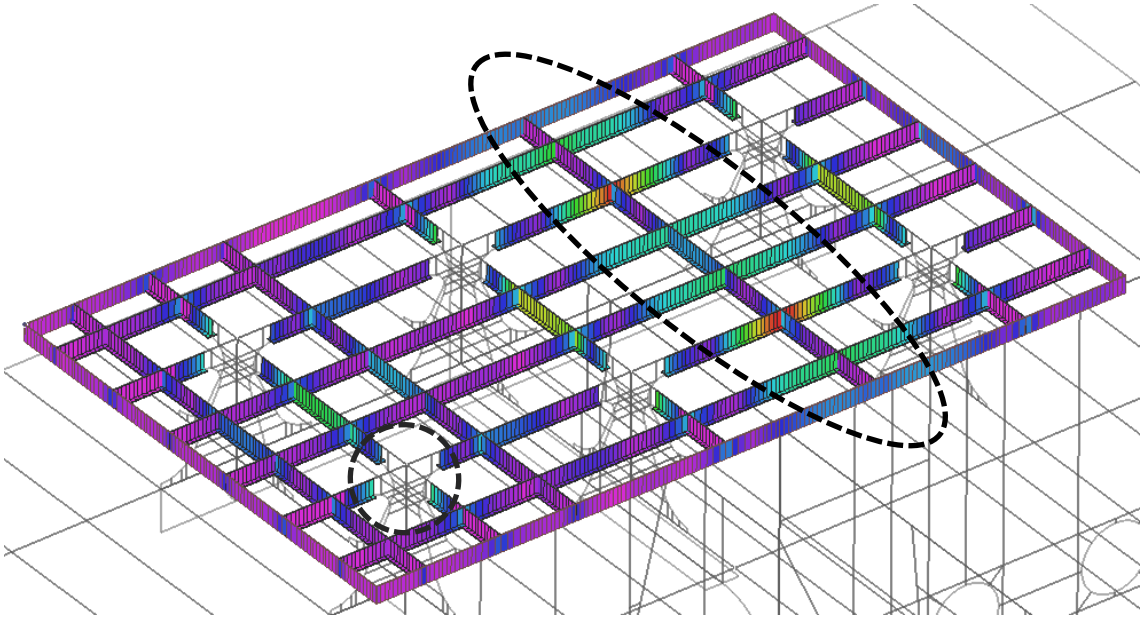


Figura 41: Painel da *laydown area*

II. Análise de fadiga simplificada

A análise de fadiga na conexão entre os stools e o convés foi realizada de acordo com a metodologia já explicitada neste relatório. Para a melhor compreensão dos resultados obtidos e as informações consideradas na análise, um fluxograma foi montado e pode ser verificado a seguir.

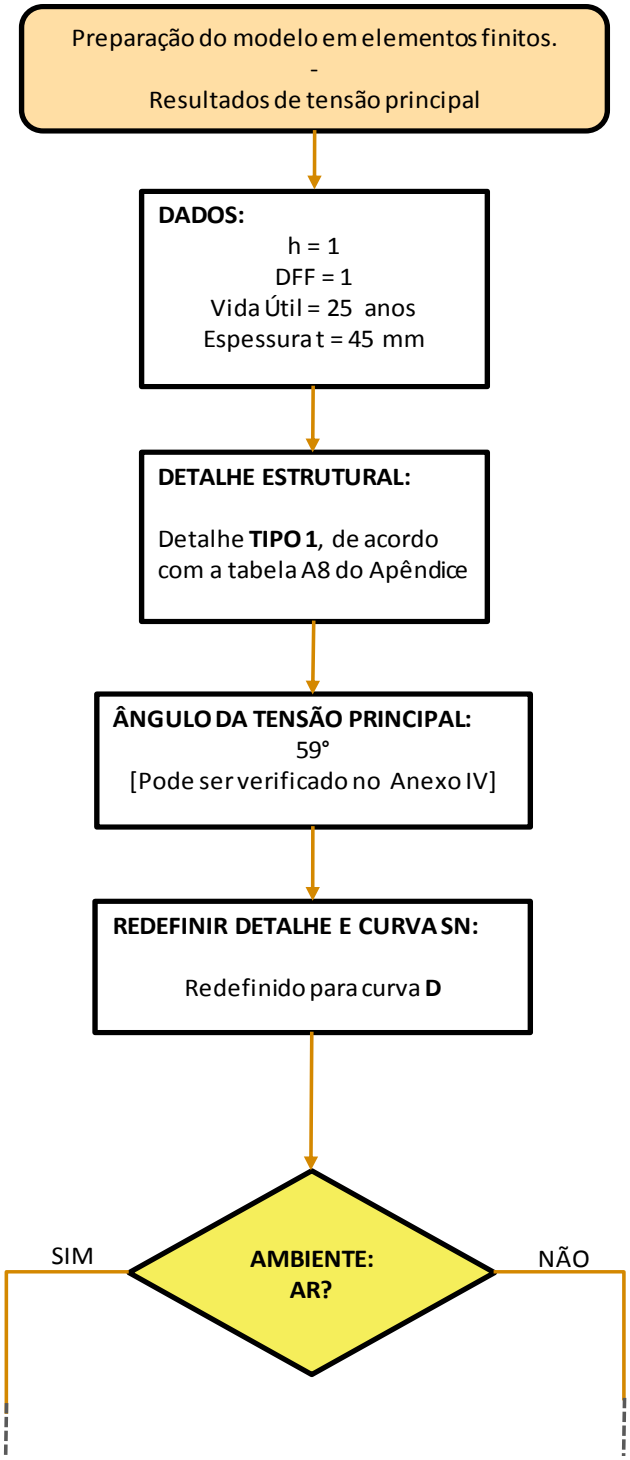


Figura 42: Fluxograma para análise de fadiga simplificada

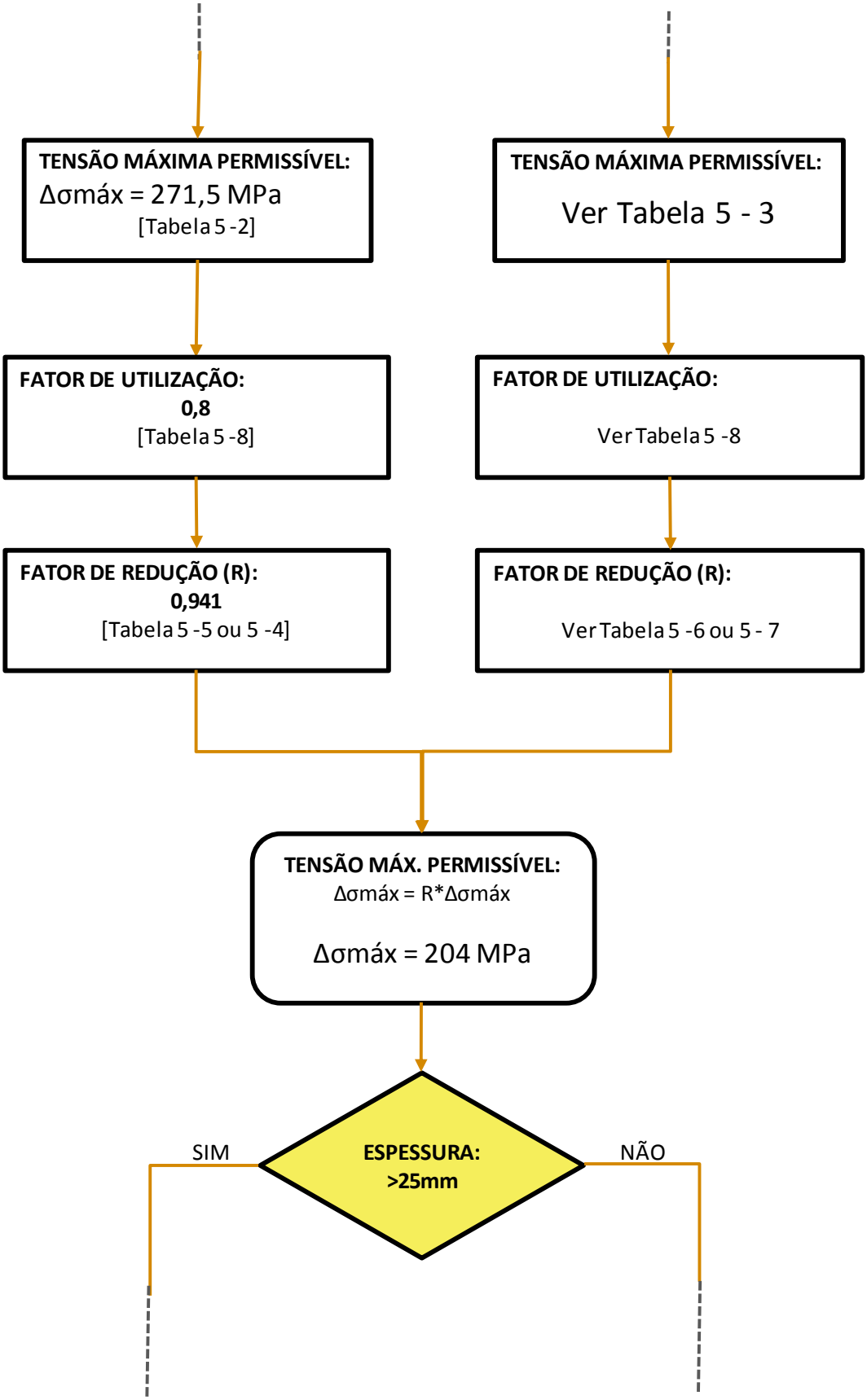


Figura 43: Fluxograma para análise de fadiga simplificada (Continuação)

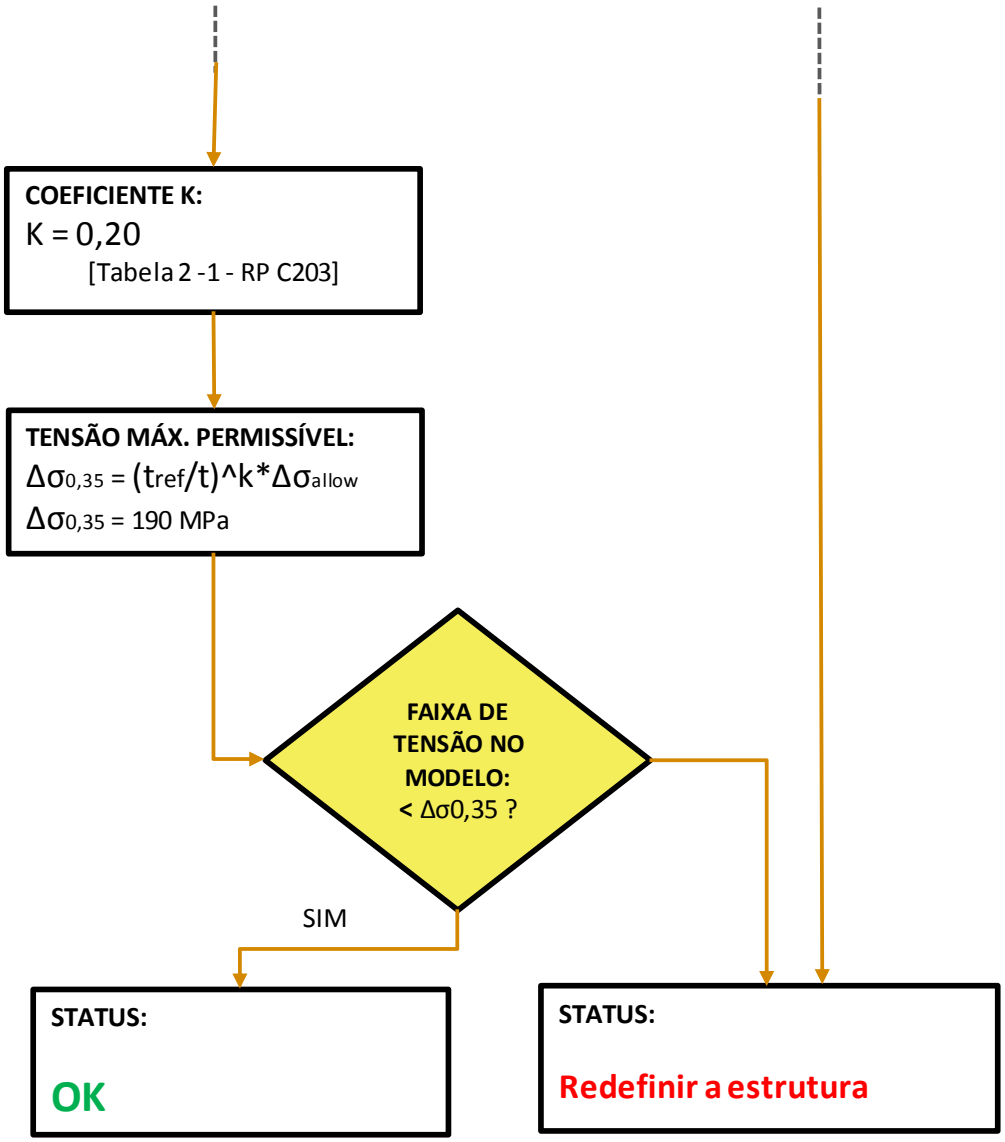


Figura 44: Fluxograma para análise de fadiga simplificada (Continuação)

A faixa de tensão obtida nos elementos da conexão entre stool e convés não apresentaram valores acima do limite obtido e apresentado no fluxograma. Os valores obtidos ficaram na faixa de 150 MPa e majoritariamente na região da conexão, conforme pode ser observado na figura 45. Além disso, observa-se que o local mais susceptível à falha é a extremidade do stool.

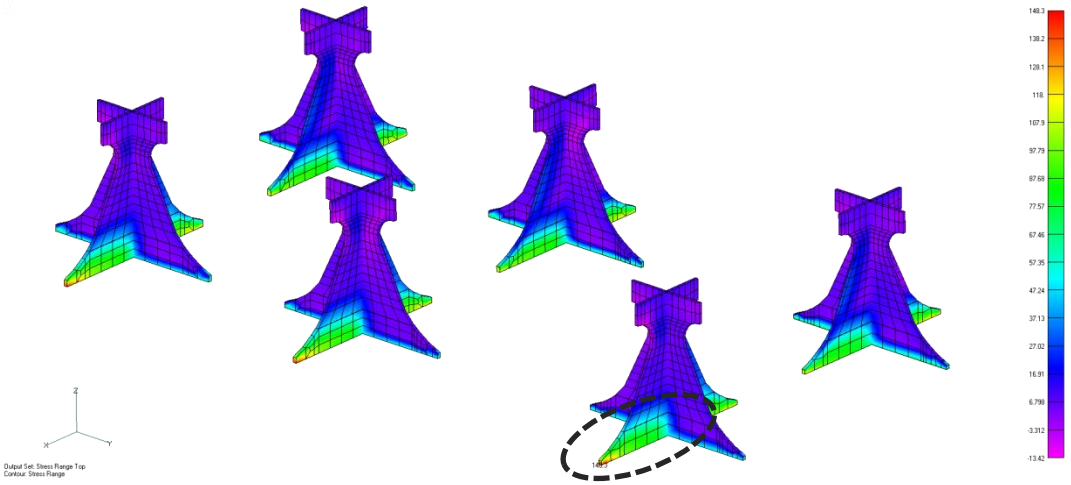


Figura 45: Região com maiores valores de stress range

III. Análise de flambagem

A verificação da flambagem mostrou que a estrutura não está susceptível a este tipo de falha. Na tabela 13 temos um dos resultados organizados em uma planilha. A análise dos valores mostra margens altas entre os valores observados e os permissíveis, mostrando que não há necessidade de reforços específicos para evitar flambagem. No entanto, a utilização de flanges nos stools mostrou-se adequada tanto como segurança para este modo de falha quanto para os resultados de tensão. Os demais resultados podem ser verificados no Anexo III deste relatório.

Tabela 13: Resultados de avaliação da flambagem do painel da *laydown area*

Results for reinforced panel:

Lateral loaded plates

$$p_{Sd} \le 4.0 \frac{f_y}{\gamma_M} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \left[\psi_y + \left(\frac{s}{l}\right)^2 \psi_x\right]$$

Psd =	0.025	<	0.4869 MPa	Pass

Resistance of plate between stiffeners

$$\tau_{Sd} \le \tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M}$$

τSd =	9.08	<	178.23 MPa	Pass

$$\sigma_{y,Sd} \le k_{sp} \cdot \sigma_{y,Rd}$$

σy,Sd =	14.67	<	118.29 MPa	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Stiffener Check						
Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:			
Criteria	Value	Result	Criteria	Value	Result	
7.50	0.076	Pass	7.54	0.072	Pass	1.187
7.51	-0.038	Pass	7.55	0.076	Pass	1.185
7.52	0.072	Pass	7.56	0.076	Pass	1.177
7.53	0.076	Pass	7.57	-0.038	Pass	

Local buckling of stiffeners

Stiffener web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Stiffener flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	200	<	410.1 mm	Pass

Stiffener Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M \sqrt{3}}$$

Stiffener	20250	<	453406 N	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Girder Check					
Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:		
Criteria	Value	Result	Criteria	Value	Result
7.50	0.695	Pass	7.54	0.823	Pass
7.51	0.060	Pass	7.55	0.169	Pass
7.52	0.696	Pass	7.56	0.822	Pass
7.53	0.162	Pass	7.57	0.053	Pass

Local buckling of girders

Girder web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Girder flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	100	<	410.1 mm	Pass

Girder Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M \sqrt{3}}$$

Girder:	60750	<	239535 MPa	Pass

9 CONCLUSÃO

Consideradas as restrições e limitações impostas, os objetivos gerais foram alcançados. O projeto apresentou-se simples e de relativa facilidade de fabricação e montagem. A influência da plataforma no convés do FPSO sempre se anunciou como comprometedora da integridade da estrutura preexistente. No entanto, conseguiu-se oferecer uma solução de reforço baseada no acréscimo de flanges nos reforçadores longitudinais que permitiu o aproveitamento da estrutura antiga. Os resultados obtidos para as análise de tensão equivalente von Mises, flambagem de paineis e fadiga estão dentro dos limites permissíveis e com as margens de segurança asseguradas.

As análises feitas permitiram avaliar o comportamento da estrutura e assim garantir a sua integridade durante os anos de operação do FPSO. Uma análise mais detalhada dos resultados poderá apresentar margens para melhora e sugere-se que isto seja feito no futuro. Uma das sugestões é que seja avaliada melhor a carga aplicada na plataforma "laydown area", deixando de ser uma carga uniforme obtida por regra para uma avaliação do peso e disposição variada dos equipamentos sobre a estrutura.

Este projeto apresentou-se como um desafio novo e instigante. Ver as teorias e consolidadas metodologias de análise estrutural render resultados dentro do esperado foi gratificante. Não é possível afirmar que um projeto pode atingir o ápice. A realidade mostra que haverá sempre espaço para aprimoramento, seja do objeto de projeto ou mesmo do autor. A "*laydown area*" como tal, também pode ter seu projeto aperfeiçoado, esmerado.

10 BIBLIOGRAFIA

[1] DNV Recommended Practice – DNV-RP-C203, Fatigue Design of Offshore Steel, April 2012;

[2] DNV Recommended Practice – DNV-RP-C201, Buckling Strength of Plated Structures, October 2010;

[3] DNV Offshore Standard – DNV-OS-C102, Topside Interface to Hull Structure, October 2011;

[4] DNV Rules for Classification of Ships, July 2012 – Part 2, Material and Welding – Chapter 2, Metallic Materials;

[5] MSC Nastran 2004, Reference Manual;

[6] AISC Manual of Steel Construction – Allowable Stress Design, 9th Edition, June 1989;

[7] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr. – Resistência dos Materiais, 3ª Ed. São Paulo – Ed. Makron Books, 1995;

[8] DNV Recommended Practice – DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010;

[9] TIMOSHENKO, Stephan P. – Resistência dos Materiais. Vol. 2. Rio de Janeiro. Ed. LTC. 1977;

[10] DNV Offshore Standard – DNV-OS-C201, Structural Design of Offshore Units, April 2011.

ANEXO I: *Características das propriedades do modelo*

Propriedade 1 - Placa 16 mm

```
 Tipo PLACA           Color 92    Layer 33      Material AH36
#Elem 17472
 Bending Matl 0       TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 15.        Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.      12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

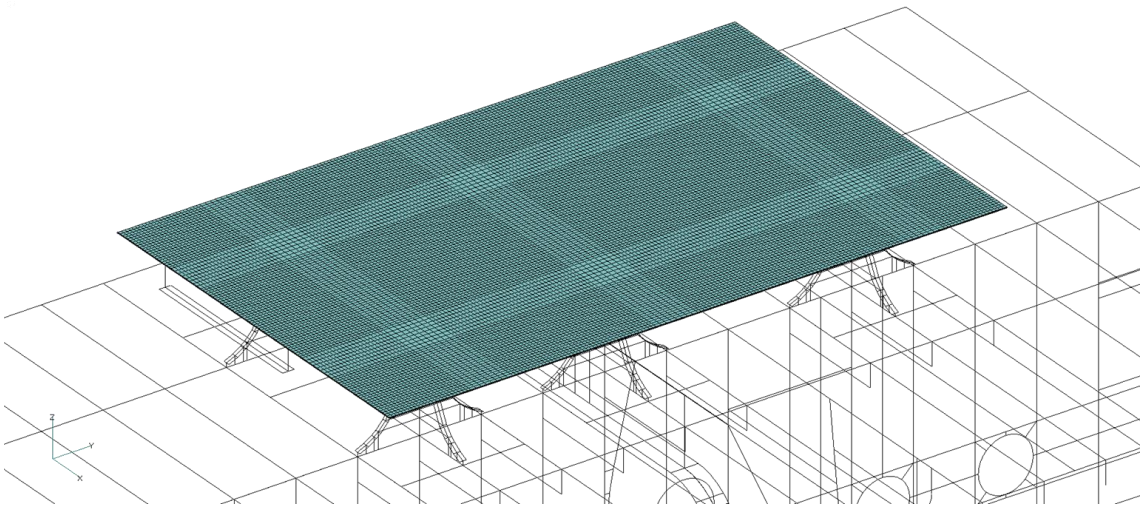


Figura 46: Chapeamento da laydown (propriedade 1)

Propriedade 2 - Placa 30 mm (Stool)

```
 Tipo PLACA           Color 63    Layer 99      Material AH36
#Elem 1536
 Bending Matl 0       TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 29.        Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.      12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

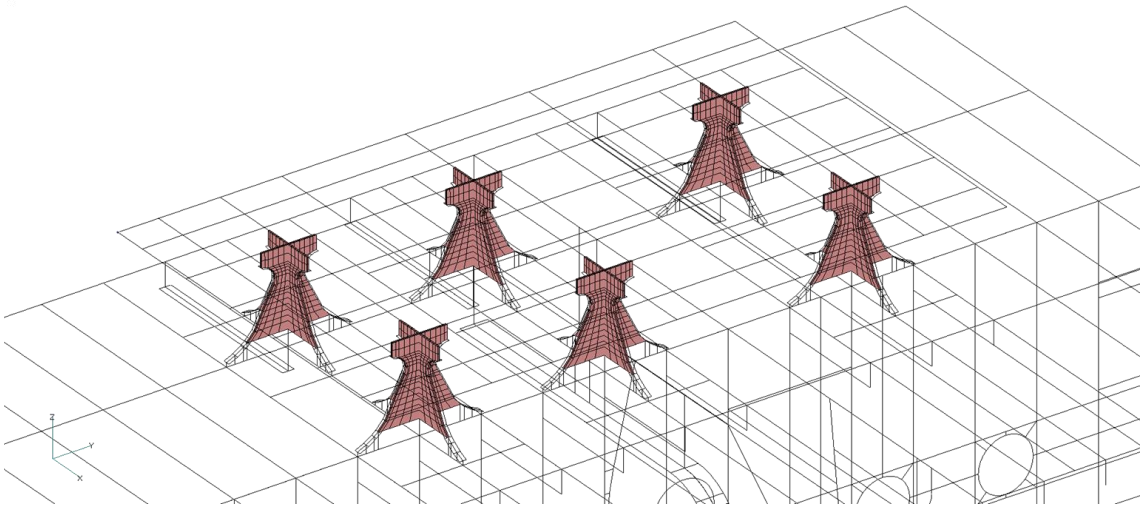


Figura 47: Stools (propriedade 2)

Propriedade 3 - Viga FB 200x12
Tipo VIGA Color 32 Layer 600 Material AH36
#Elem 544
SHAPE - Rectangular Bar
Height 200. Width 11. Width,Bottom 0.
Top Thick 0. Bot Thick 0. Thick 0.
End A Area 2200. ShearAr, K1 1884.62 ShearAr, K2 1869.33
I1 22183.3 I2 7333333. I12 0.
NS Mass/Len 0. Warp Const 0. J 86035.5
Perimeter 422.
Neutral Axis Off A: Y 0. Z 0.
Neutral Axis Off B: Y 0. Z 0.
Recover Stresses At: Y -5.5 Z -100.
Recover Stresses At: Y 5.5 Z -100.
Recover Stresses At: Y 5.5 Z 100.
Recover Stresses At: Y -5.5 Z 100.

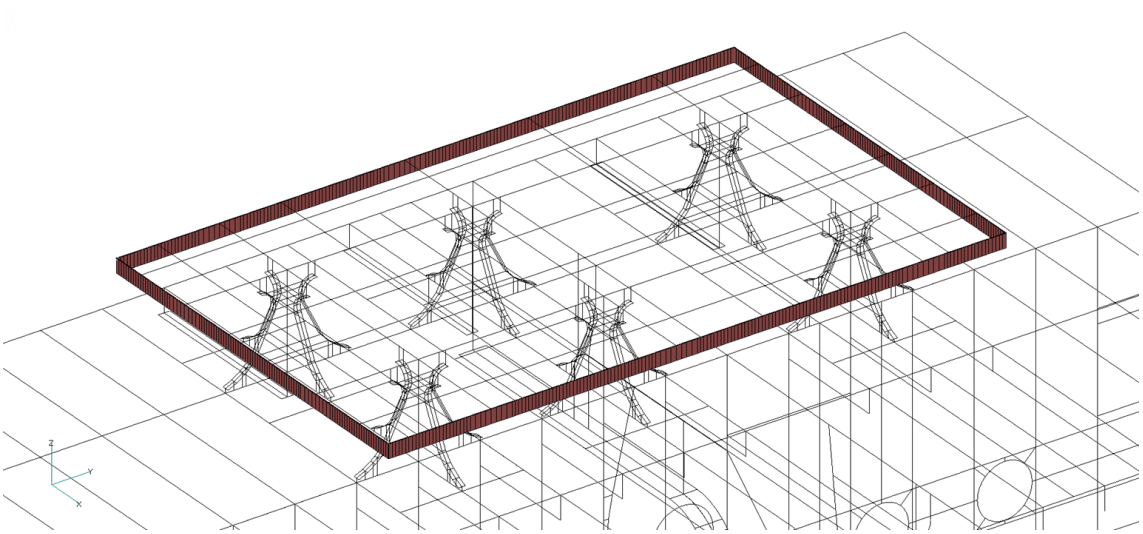


Figura 48: Propriedade 3

Propriedade 4 - Viga T 200X12 100x12
Tipo VIGA Color 128 Layer 600 Material AH36
#Elem 1488
SHAPE - T Section
Height 200. Width 100. Width,Bottom 0.
Top Thick 11. Bot Thick 0. Thick 11.
End A Area 3179. ShearAr, K1 981.305 ShearAr, K2
1875.82
I1 937630. I2 13393527. I12 0.
NS Mass/Len 0. Warp Const 0. J 129072.
Perimeter 600.
Neutral Axis Off A: Y 0. Z -62.7436
Neutral Axis Off B: Y 0. Z -62.7436
Recover Stresses At: Y -5.5 Z -191.846
Recover Stresses At: Y 5.5 Z -191.846
Recover Stresses At: Y 50. Z 8.15437
Recover Stresses At: Y -50. Z 8.15437

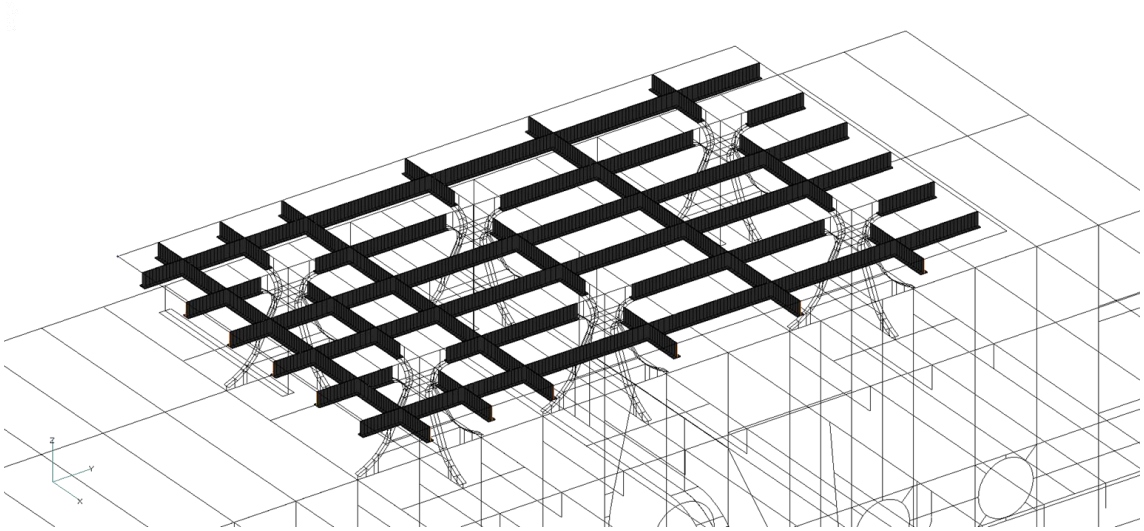


Figura 49: Propriedade 4

Propriedade 5 - Placa FB

```
 Tipo PLACA           Color 36    Layer 12      Material 1
#Elem 436
 Bending Matl 0       TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 23.5       Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.      12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

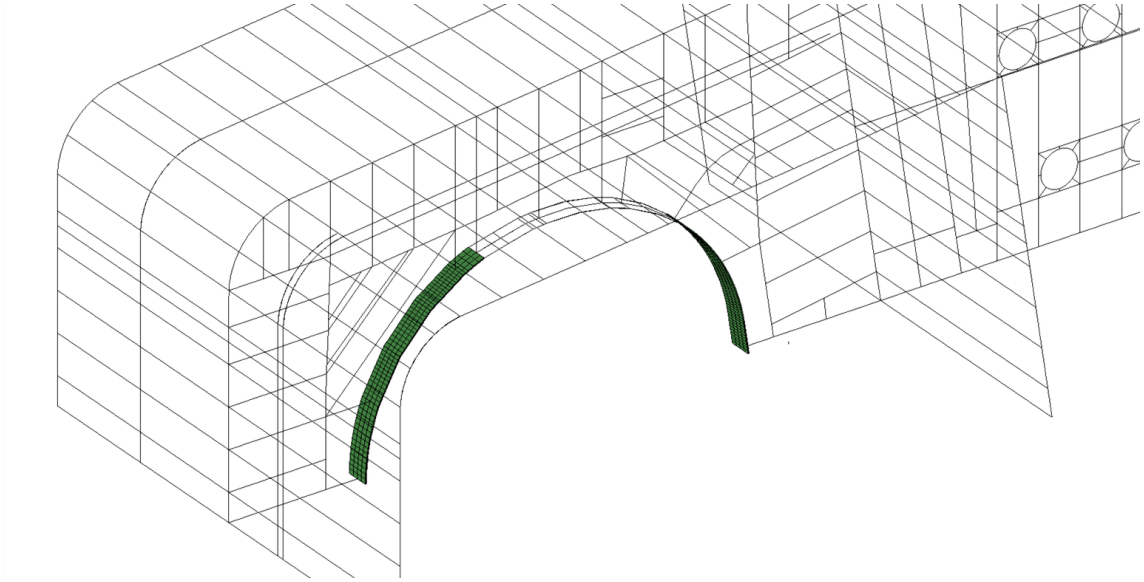


Figura 50: Propriedade 5

Propriedade 6 - Placa 13,5 mm

```
 Tipo PLACA          Color 92    Layer 12      Material 1
#Elem 9858
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 12.       Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

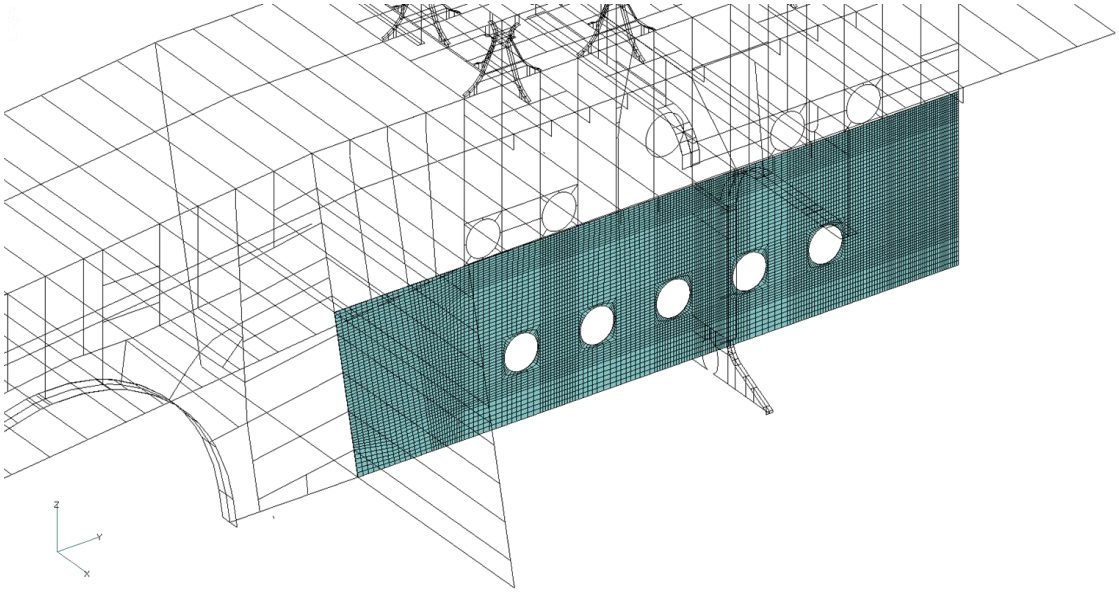


Figura 51: Propriedade 6

Propriedade 7 - Placa FB 480x31,5

```
 Tipo PLACA          Color 18    Layer 12      Material 1
#Elem 160
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 30.       Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

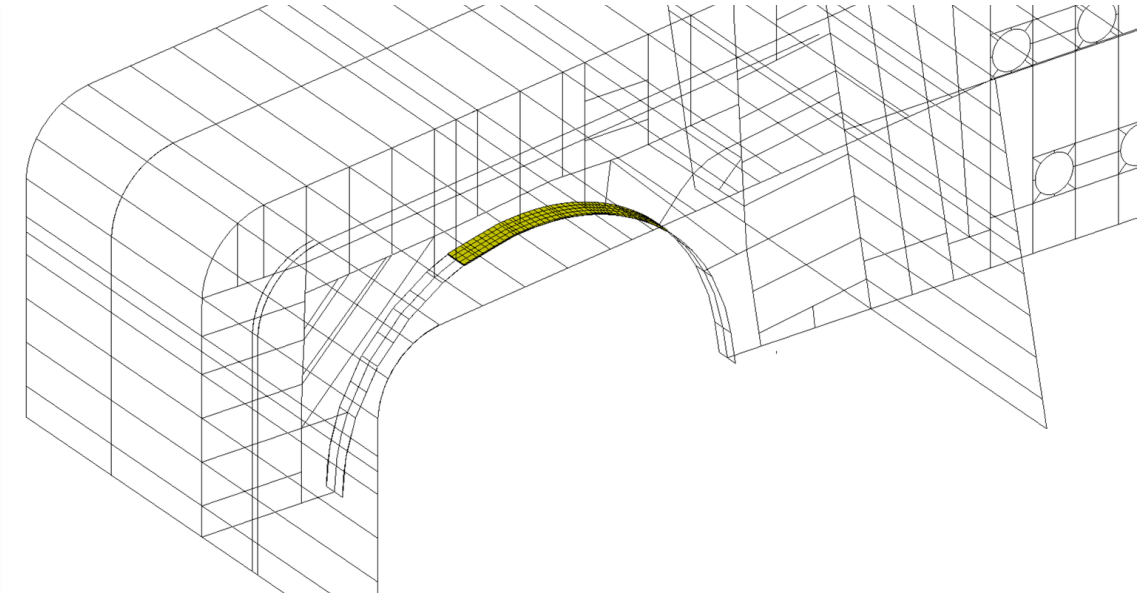


Figura 52: Propriedade 7

Propriedade 8 - Placa FB 150x16

```
 Tipo PLACA            Color 38    Layer 66      Material 1
#Elem 58
 Bending Matl 0        TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 14.5        Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.       12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

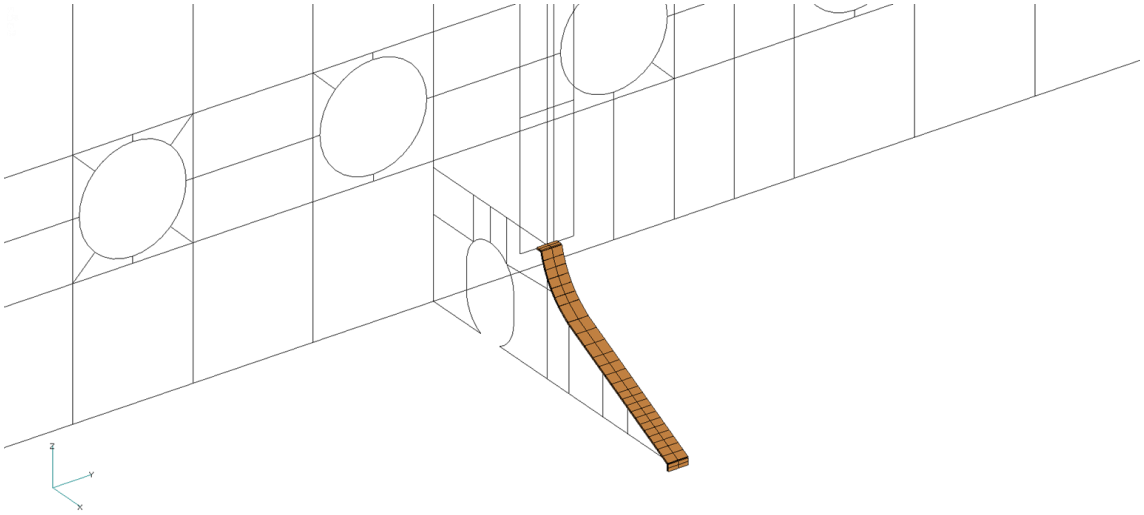


Figura 53: Propriedade 8

Propriedade 9 - Placa 19 mm

```
 Tipo PLACA            Color 48    Layer 12      Material AH36
#Elem 2700
 Bending Matl 0        TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.5        Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.       12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

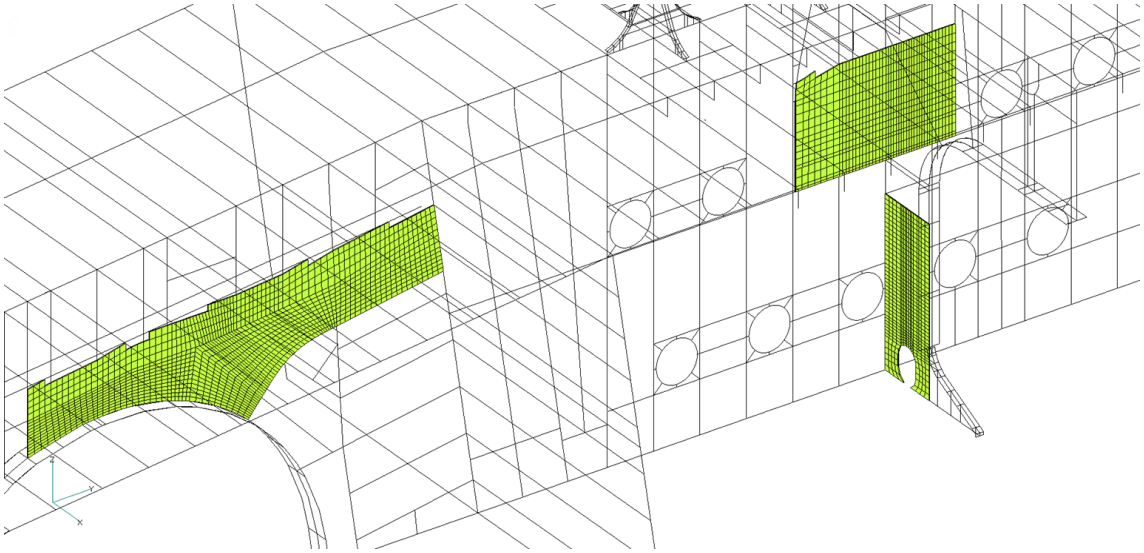


Figura 54: Propriedade 9

Propriedade 10 - Placa 16 mm

```
 Tipo PLACA          Color 13    Layer 66      Material AH36
#Elem 115
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 14.5      Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

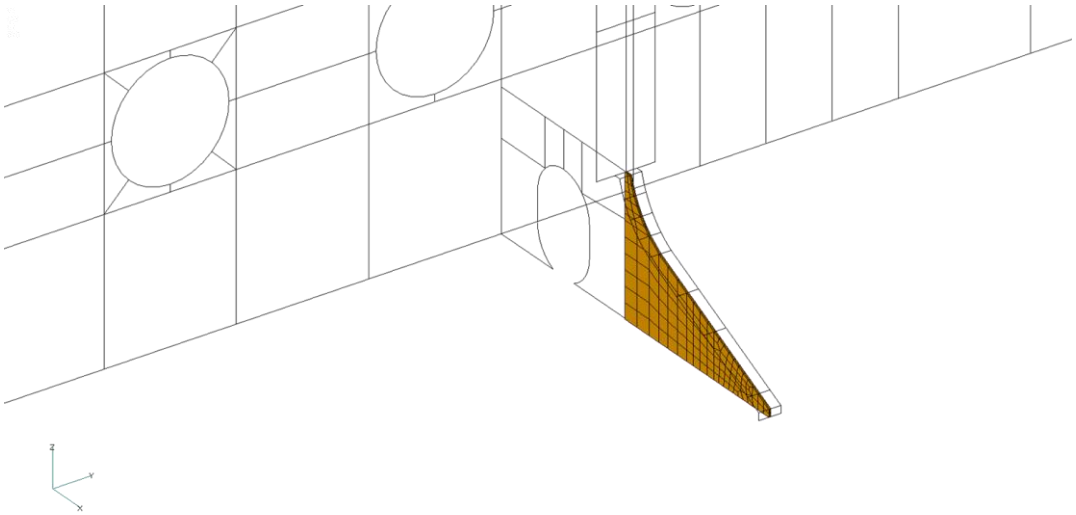


Figura 55: Propriedade 10

Propriedade 11 - Placa T 400x31,5

```
 Tipo PLACA          Color 99    Layer 66      Material AH36
#Elem 508
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 30.       Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

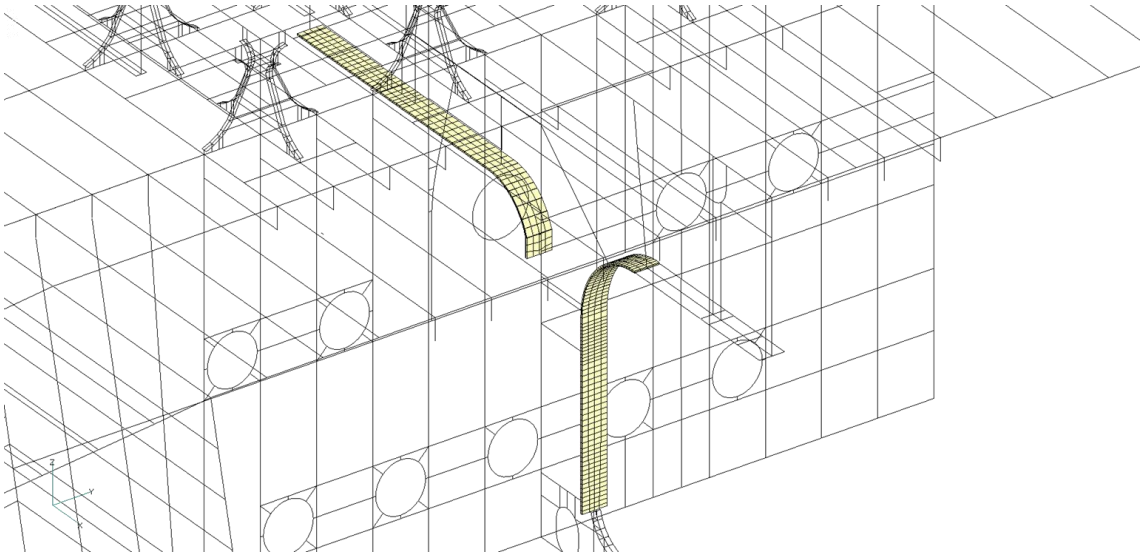


Figura 56: Propriedade 11

Propriedade 12 - Placa 35 mm

```
 Tipo PLACA          Color 98    Layer 66      Material AH36
#Elem 943
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 33.5      Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

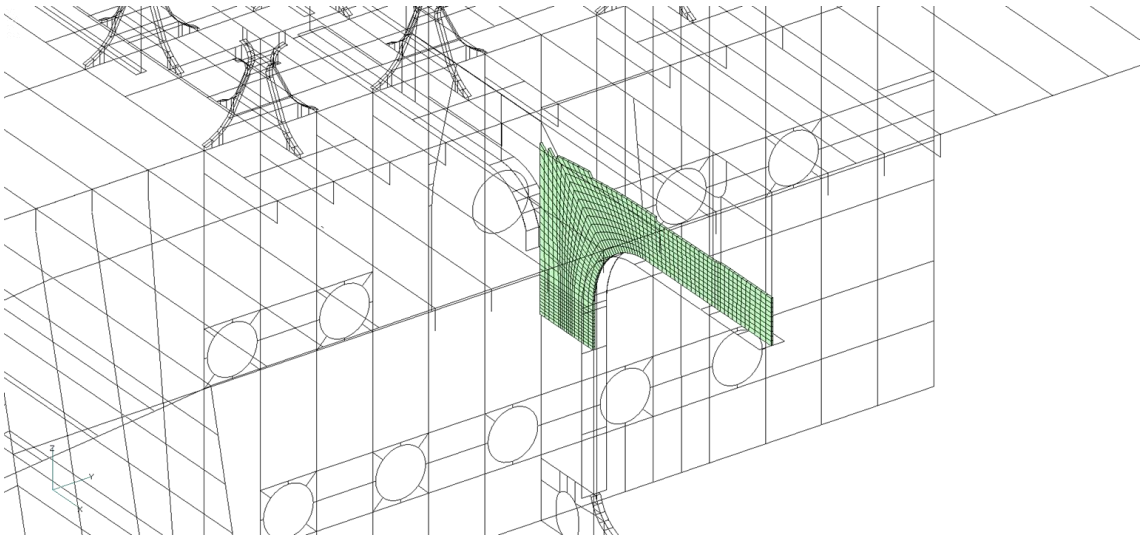


Figura 57: Propriedade 12

Propriedade 13 - Placa T 400x40

```
 Tipo PLACA          Color 74    Layer 66      Material AH36
#Elem 120
 Bending Matl 0      TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 38.5      Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.     12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

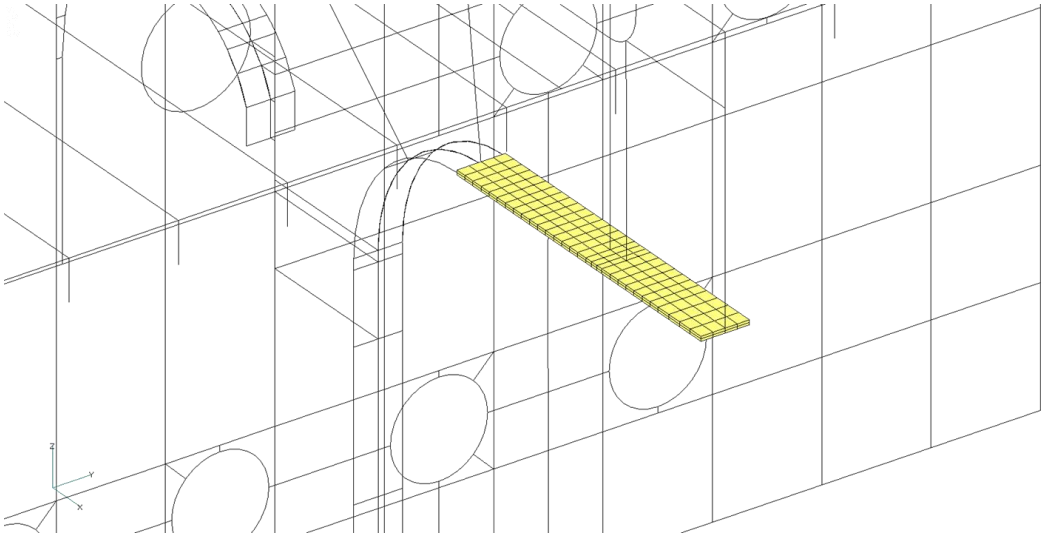


Figura 58: Propriedade 13

Propriedade 14 - Placa 28 mm

```
 Tipo PLACA          Color 19    Layer 66       Material AH36
#Elem 151
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 26.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

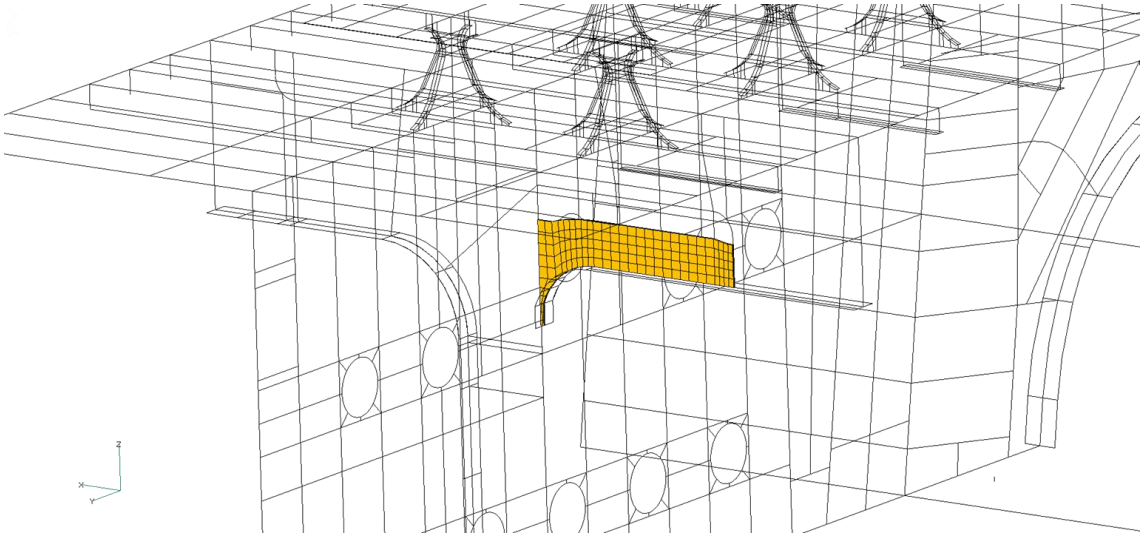


Figura 59: Propriedade 14

Propriedade 15 - Placa 31,5 mm

```
 Tipo PLACA          Color 123   Layer 66       Material AH36
#Elem 126
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 30.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

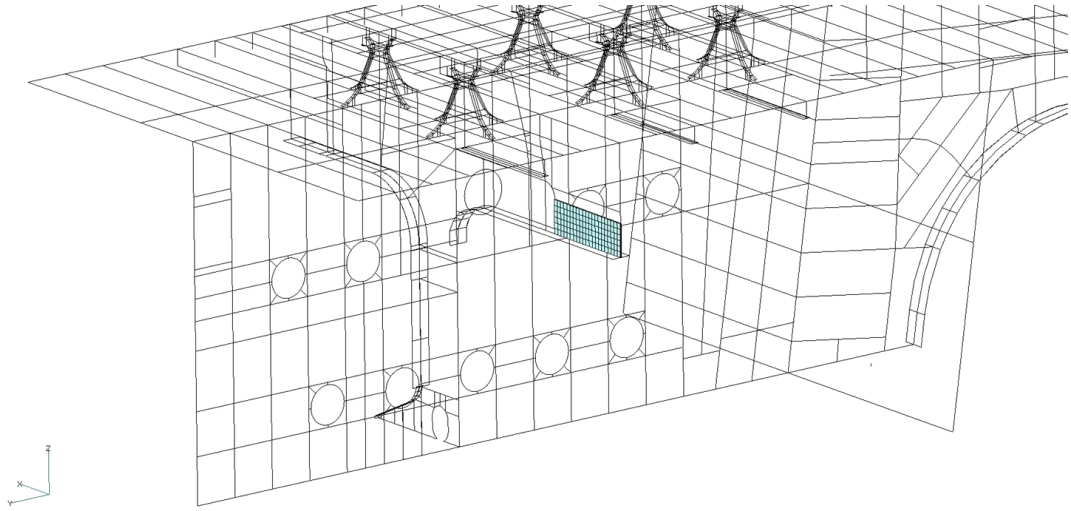


Figura 60: Propriedade 15

Propriedade 16 - Placa 13 mm

```
 Tipo PLACA          Color 67    Layer 12       Material 1
#Elem 2540
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 11.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

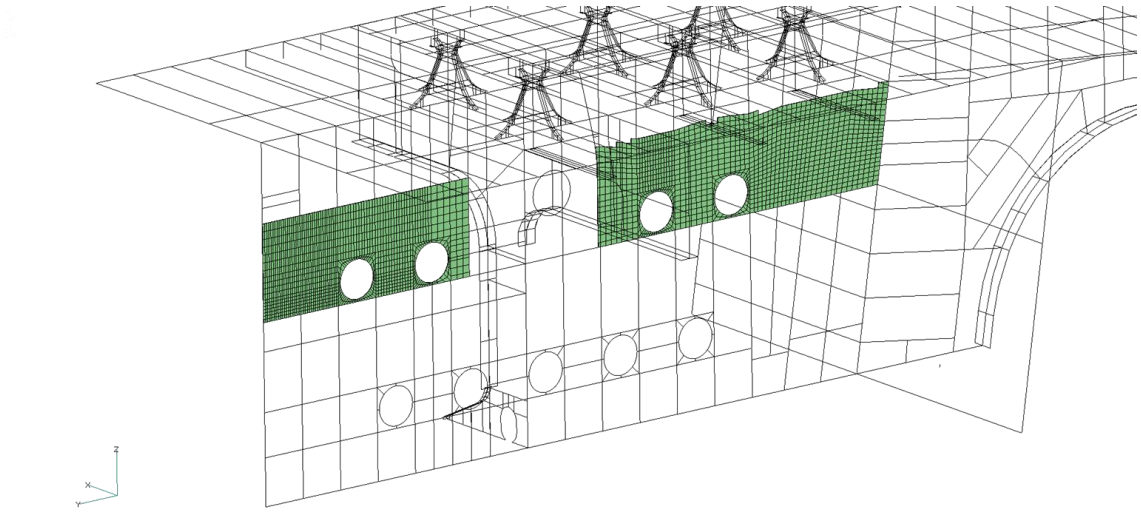


Figura 61: Propriedade 16

Propriedade 17 - Placa 12 mm

```
 Tipo PLACA          Color 35    Layer 12       Material 1
#Elem 4616
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 10.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

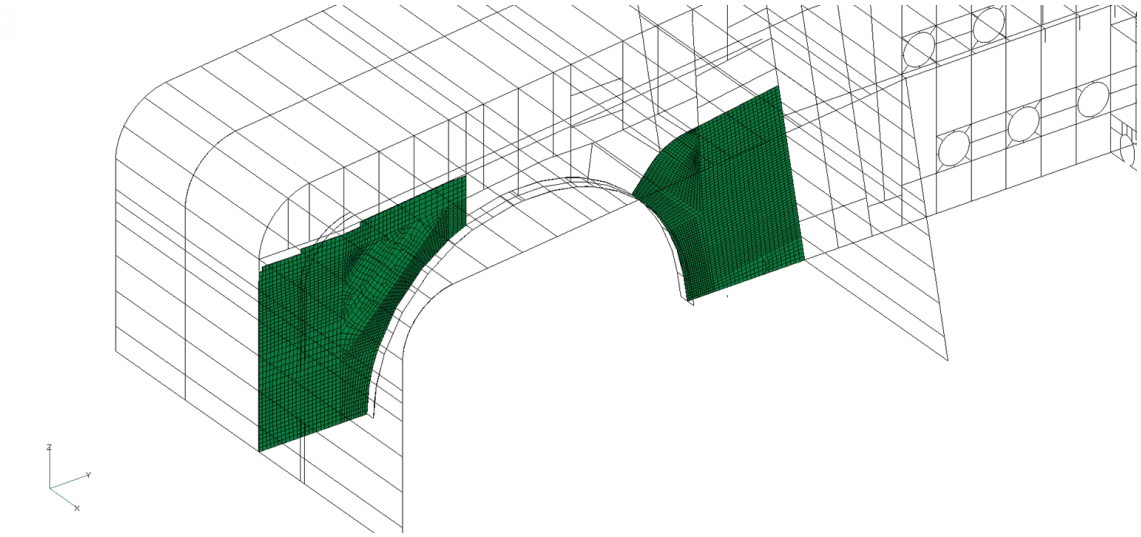


Figura 62: Propriedade 17

Propriedade 18 - Placa 20 mm

```
 Tipo PLACA          Color 56    Layer 99       Material AH36
#Elem 18467
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

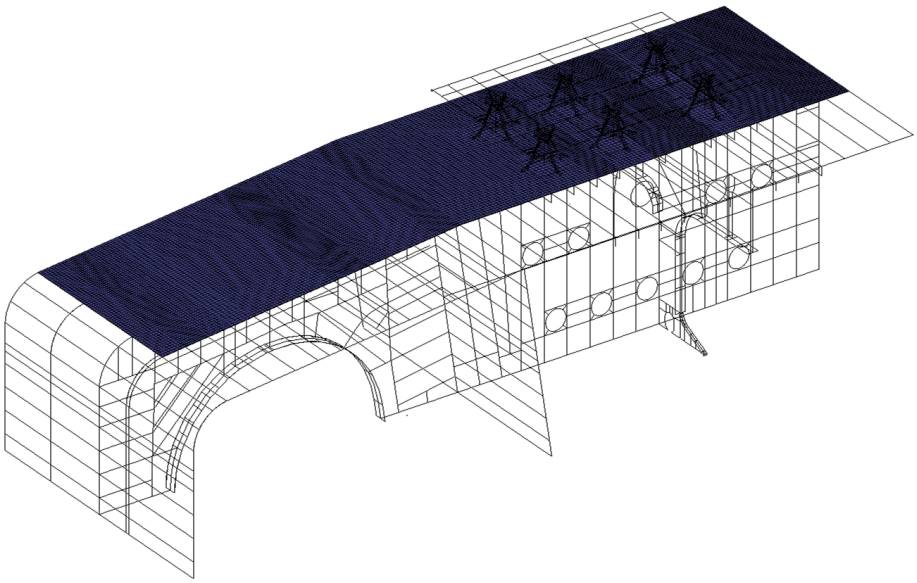


Figura 63: Propriedade 18

Propriedade 19 - Placa 19 mm

```
 Tipo PLACA          Color 38    Layer 77       Material 1
#Elem 2124
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

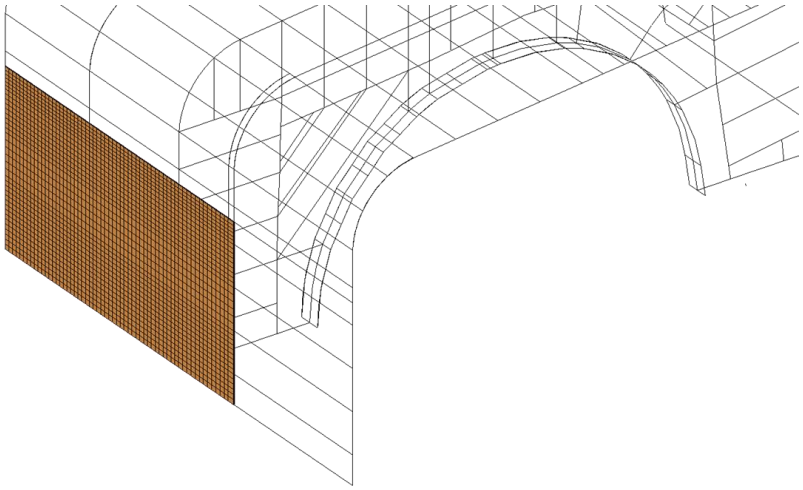


Figura 64: Propriedade 19

Propriedade 20 - Placa 18 mm

```
 Tipo PLACA          Color 57    Layer 33       Material AH36
#Elem 10642
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 15.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

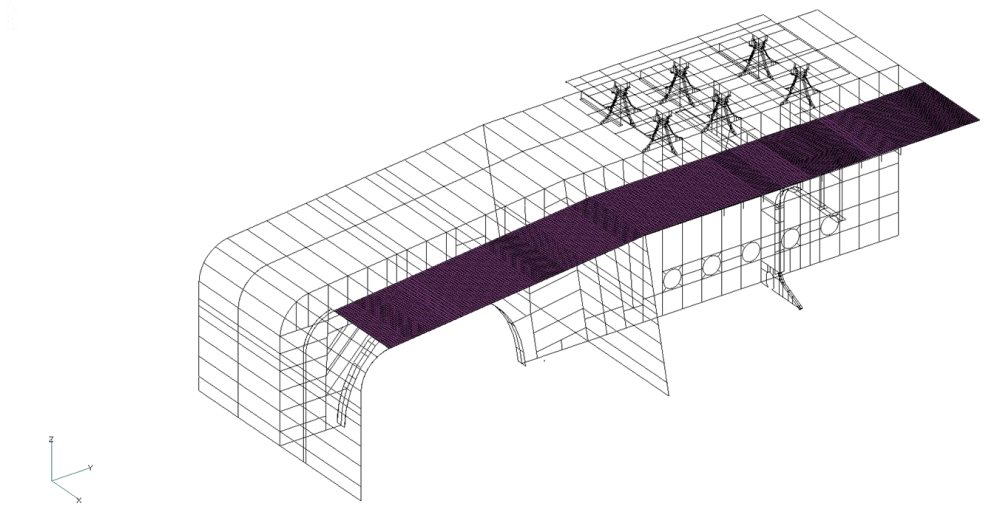


Figura 65: Propriedade 20

Propriedade 21 - Placa 18,5 mm

```
 Tipo PLACA          Color 39    Layer 77       Material 1
#Elem 1224
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

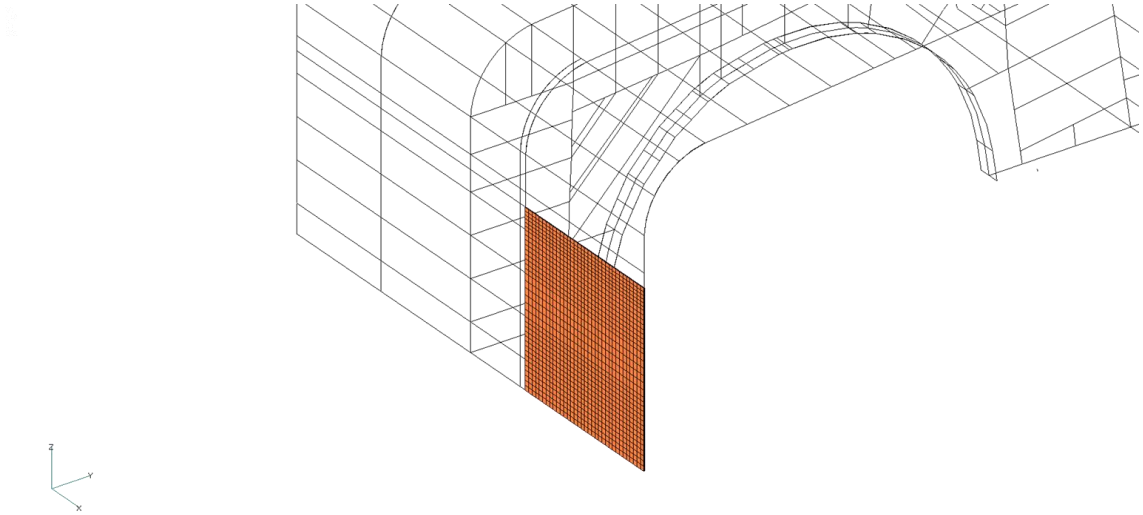


Figura 66: Propriedade 21

Propriedade 22 - Placa 15,5 mm

```
 Tipo PLACA          Color 63    Layer 88       Material 1
#Elem 5022
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 14.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

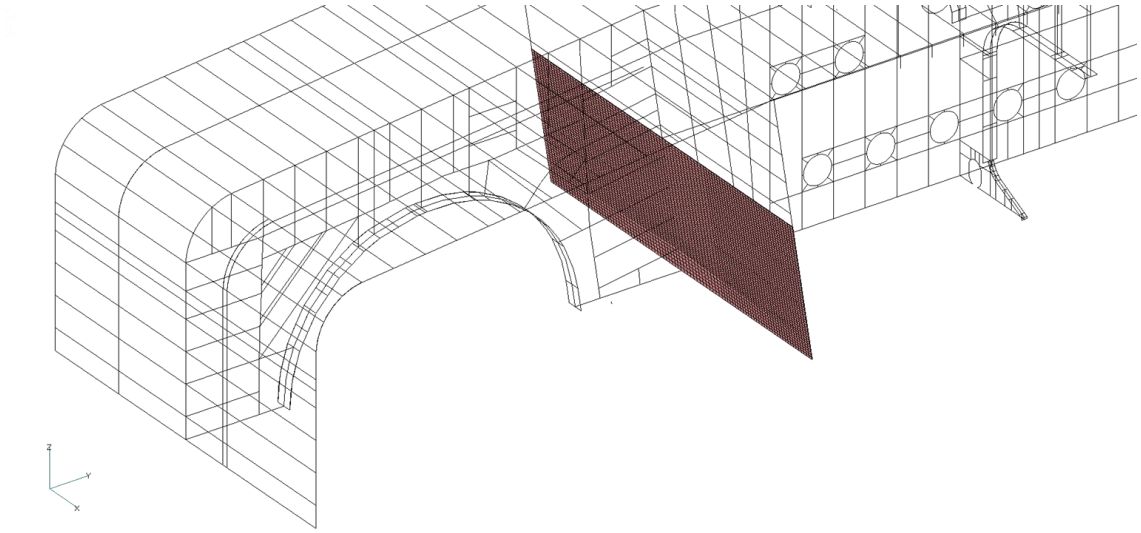


Figura 67: Propriedade 22

Propriedade 23 - Placa 17,5 mm A

```
 Tipo PLACA          Color 64    Layer 88       Material AH36
#Elem 2022
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 16.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

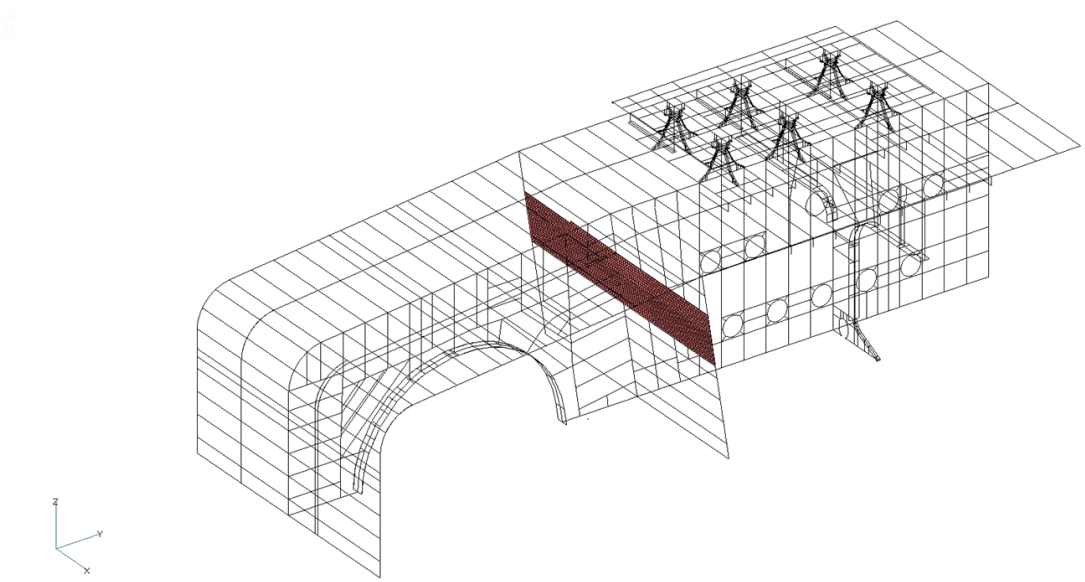


Figura 68: Propriedade 23

Propriedade 24 - Viga B 340x22,5
Tipo VIGA Color 3 Layer 99 Material AH36
#Elem 1767
SHAPE - Rectangular Bar
Height 340. Width 19. Width,Bottom 0.
Top Thick 0. Bot Thick 0. Thick 0.
End A Area 6460. ShearAr, K1 5534.23 ShearAr, K2 5489.04
I1 194338. I2 62231333. I12 0.
NS Mass/Len 0. Warp Const 0. J 753236.
Perimeter 718.
Neutral Axis Off A: Y 0. Z 0.
Neutral Axis Off B: Y 0. Z 0.
Recover Stresses At: Y -9.5 Z -170.
Recover Stresses At: Y 9.5 Z -170.
Recover Stresses At: Y 9.5 Z 170.
Recover Stresses At: Y -9.5 Z 170.

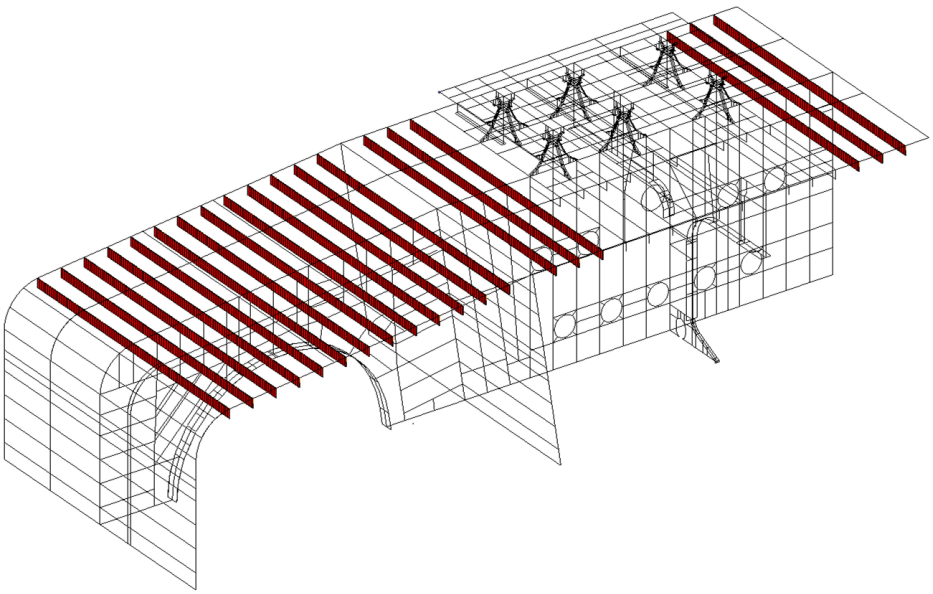


Figura 69: Propriedade 24

Propriedade 25 - T 340x22,5 150x35
Tipo VIGA Color 92 Layer 100 Material AH36
#Elem 958
SHAPE - T Section
Height 340. Width 150. Width,Bottom 0.
Top Thick 33. Bot Thick 0. Thick 20.5
End A Area 11243.5 ShearAr, K1 4134.93 ShearAr, K2 5972.55
I1 9501654. I2 129953297. I12 0.
NS Mass/Len 0. Warp Const 0. J 2549533.
Perimeter 980.
Neutral Axis Off A: Y 0. Z 91.4505
Neutral Axis Off B: Y 0. Z 91.4505
Recover Stresses At: Y 10.25 Z 319.794
Recover Stresses At: Y -10.25 Z 319.794
Recover Stresses At: Y -75. Z -20.2063
Recover Stresses At: Y 75. Z -20.2063

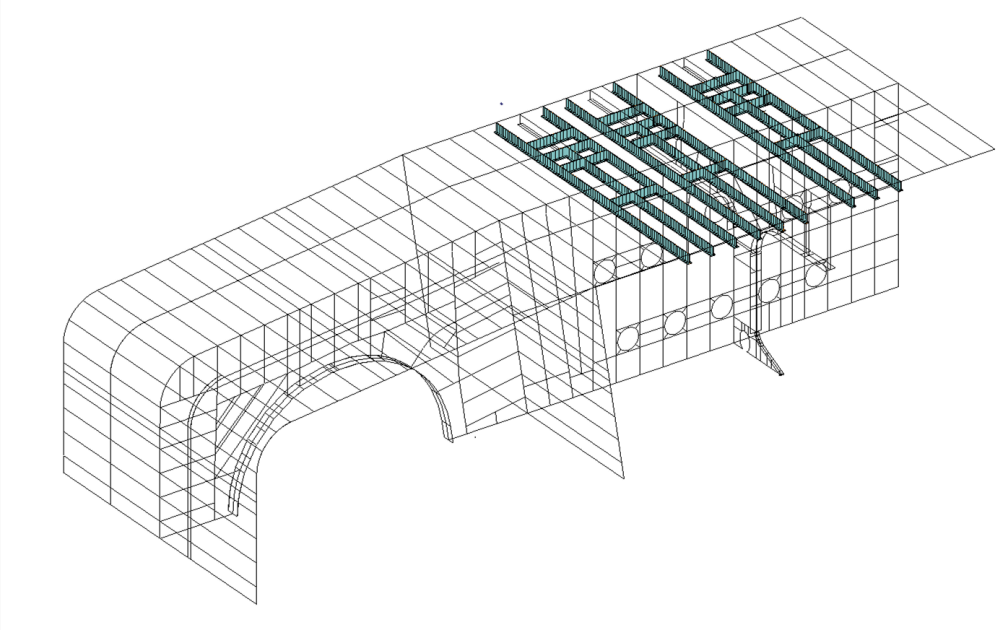


Figura 25: Propriedade 9

Propriedade 26 - Placa 19 mm

```
 Tipo PLACA           Color 44    Layer 200      Material AH36
#Elem 2179
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 16.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

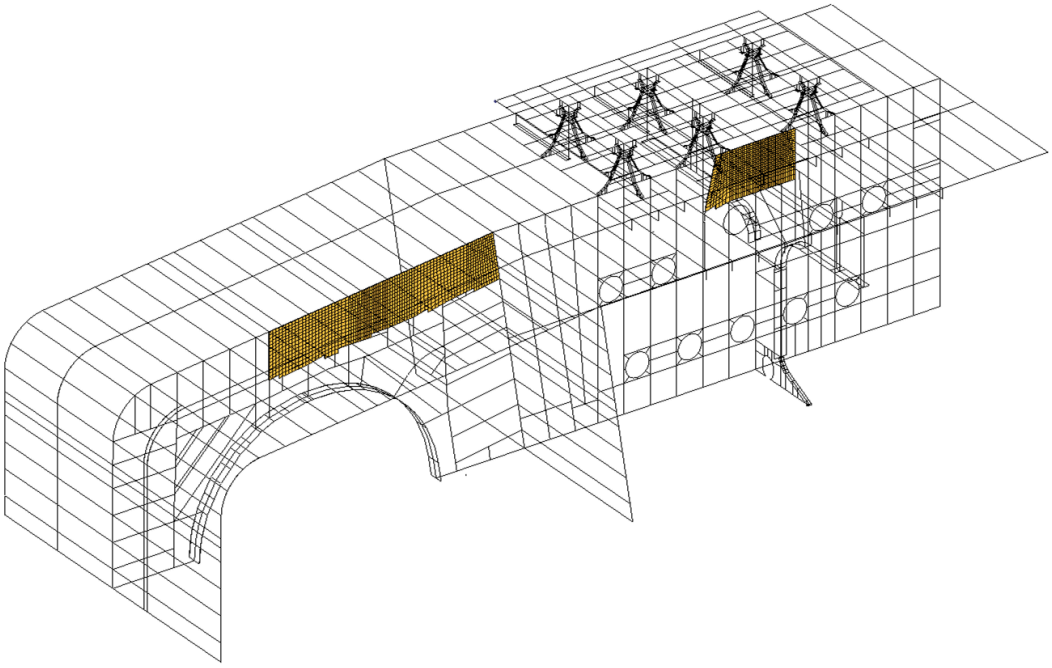


Figura 70: Propriedade 26

Propriedade 27 - Placa 35 mm

```
 Tipo PLACA          Color 73    Layer 200      Material AH36
#Elem 1334
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 32.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

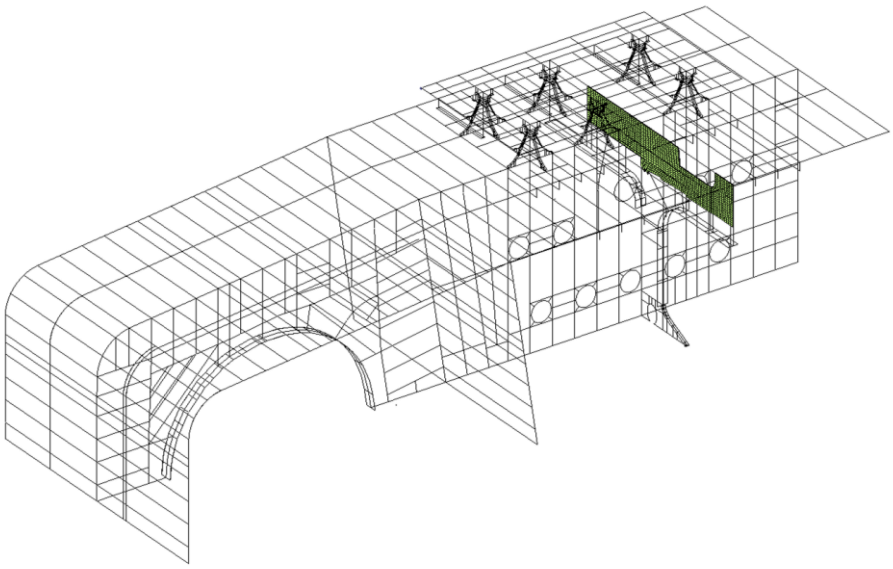


Figura 71: Propriedade 27

Propriedade 28 - Placa 46 mm

```
 Tipo PLACA          Color 19    Layer 200      Material AH36
#Elem 199
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 43.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

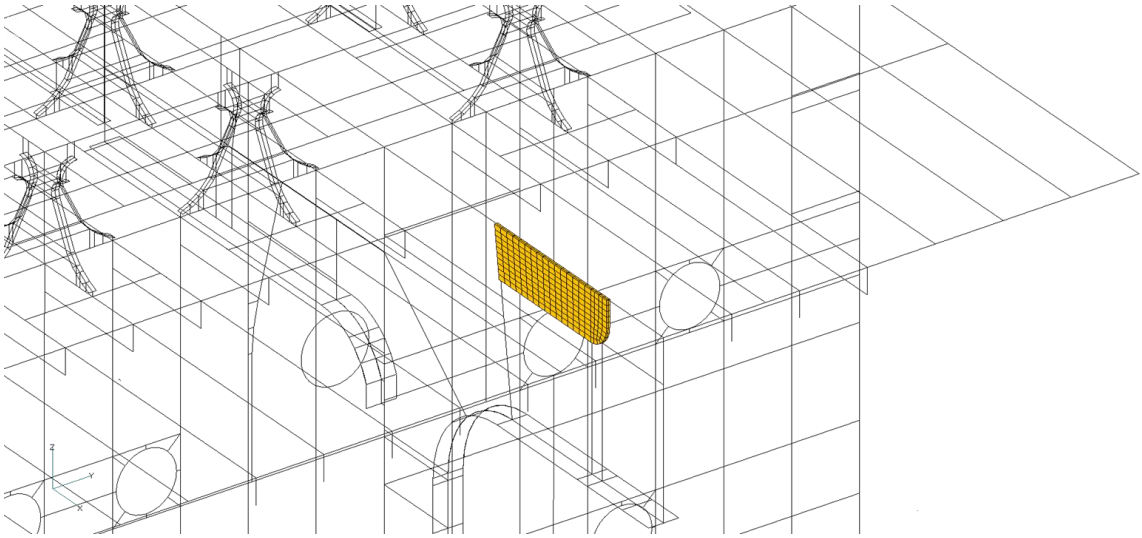


Figura 72: Propriedade 28

Propriedade 29 - Placa 28 mm

```
 Tipo PLACA            Color 44    Layer 200      Material AH36
#Elem 76
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 25.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

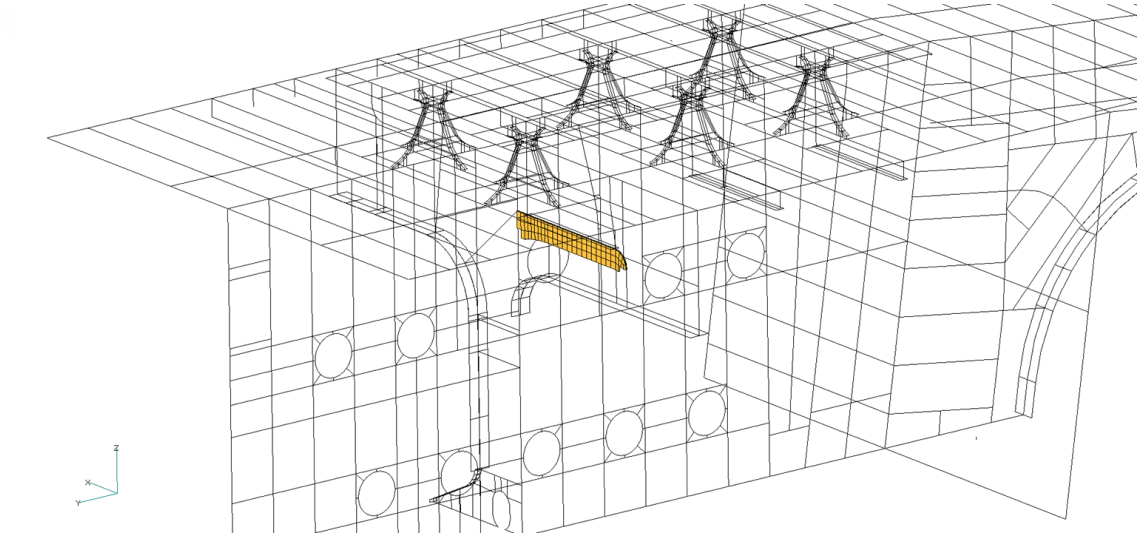


Figura 73: Propriedade 29

Propriedade 30 - Placa 31,5 mm

```
 Tipo PLACA            Color 99    Layer 200      Material AH36
#Elem 420
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 29.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

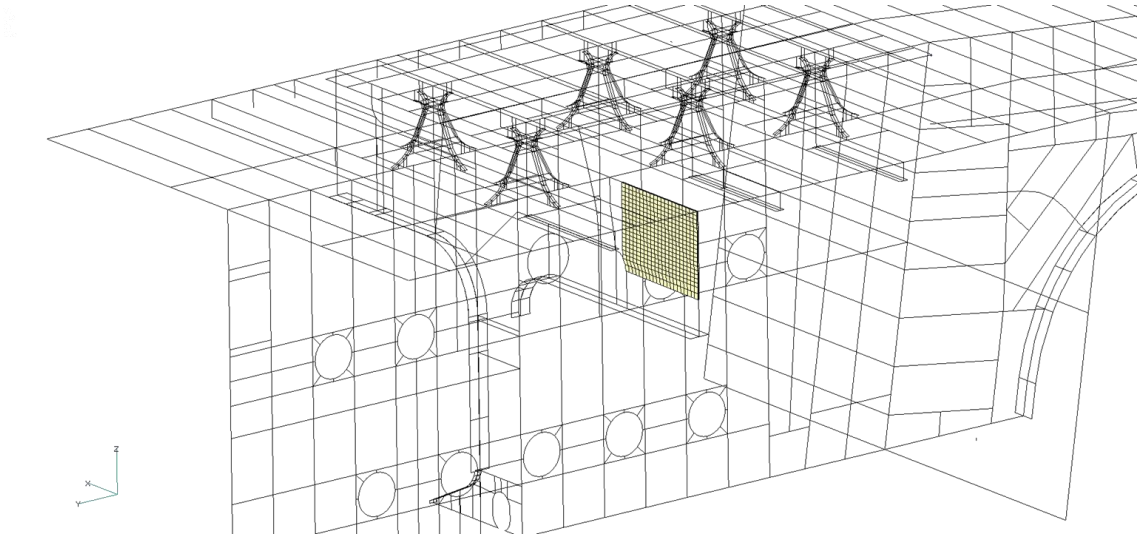


Figura 74: Propriedade 30

Propriedade 31 - Placa 13 mm

```
 Tipo PLACA          Color 42    Layer 200      Material 1
#Elem 2636
 Bending Matl 0          TrShear Matl 0          CouplingMatl 0
 Espessura 10.5          Top Fiber 0.            Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.         12I/T**3 0.             Tshear/T 0.
```

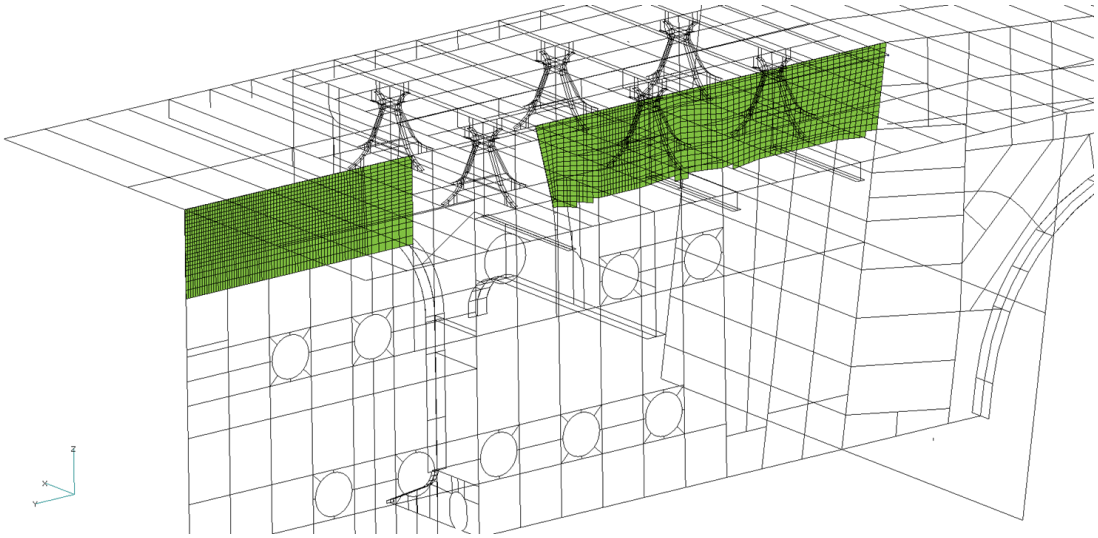


Figura 75: Propriedade 31

Propriedade 32 - Placa 12 mm

```
 Tipo PLACA          Color 36    Layer 200      Material 1
#Elem 758
 Bending Matl 0          TrShear Matl 0          CouplingMatl 0
 Espessura 9.5           Top Fiber 0.            Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.         12I/T**3 0.             Tshear/T 0.
```

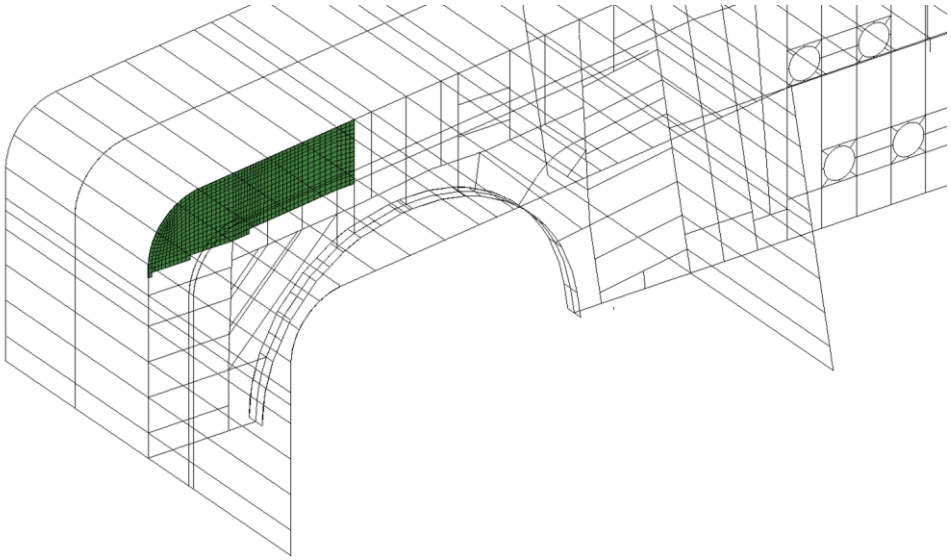


Figura 76: Propriedade 32

Propriedade 33 - Placa 19,5 mm

```
 Tipo PLACA          Color 8     Layer 200      Material 1
#Elem 1088
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

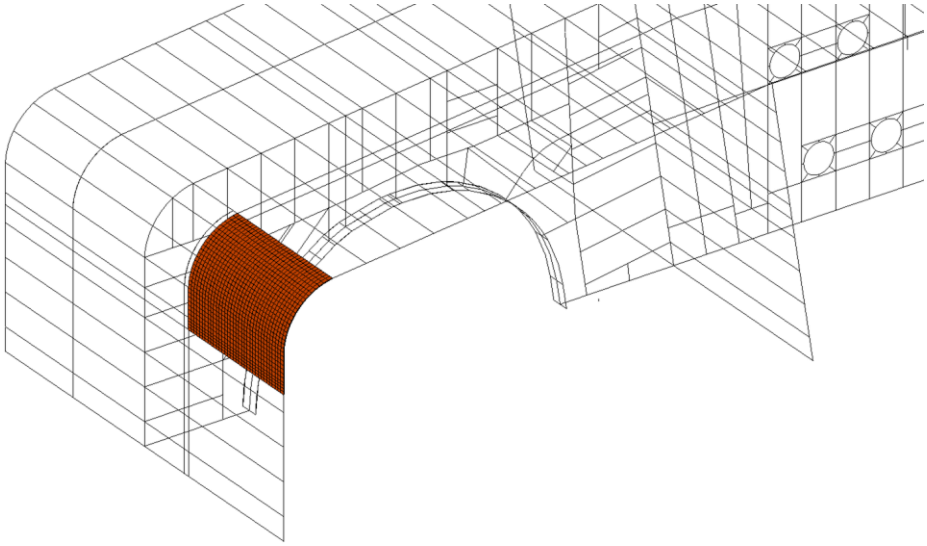


Figura 77: Propriedade 33

Propriedade 34 - Placa 20 mm

```
 Tipo PLACA          Color 34    Layer 200      Material 1
#Elem 1888
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 17.5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

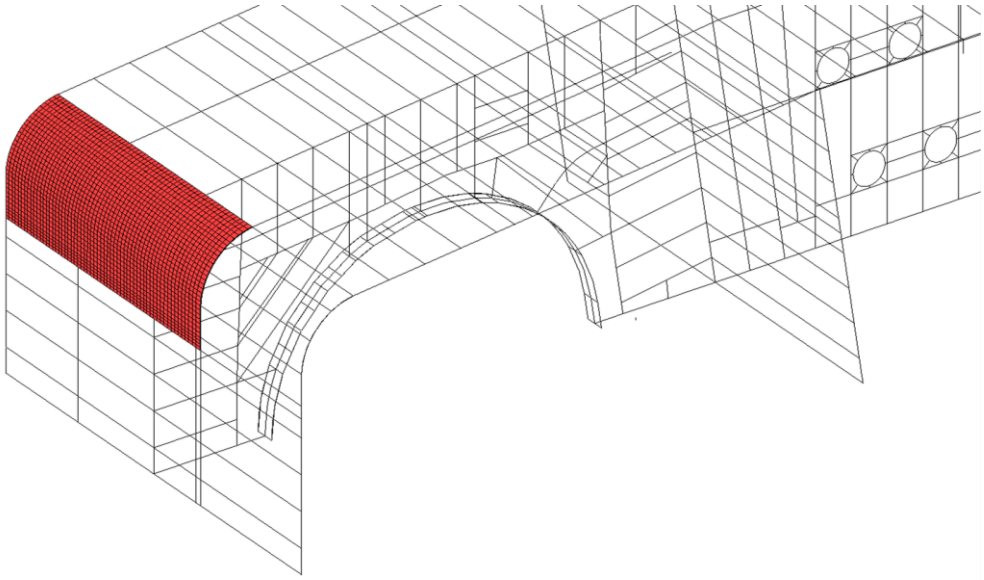


Figura 78: Propriedade 34

Propriedade 35 - Placa 17,5 mm

```
 Tipo PLACA            Color 129   Layer 200      Material 1
#Elem 1512
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 15.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

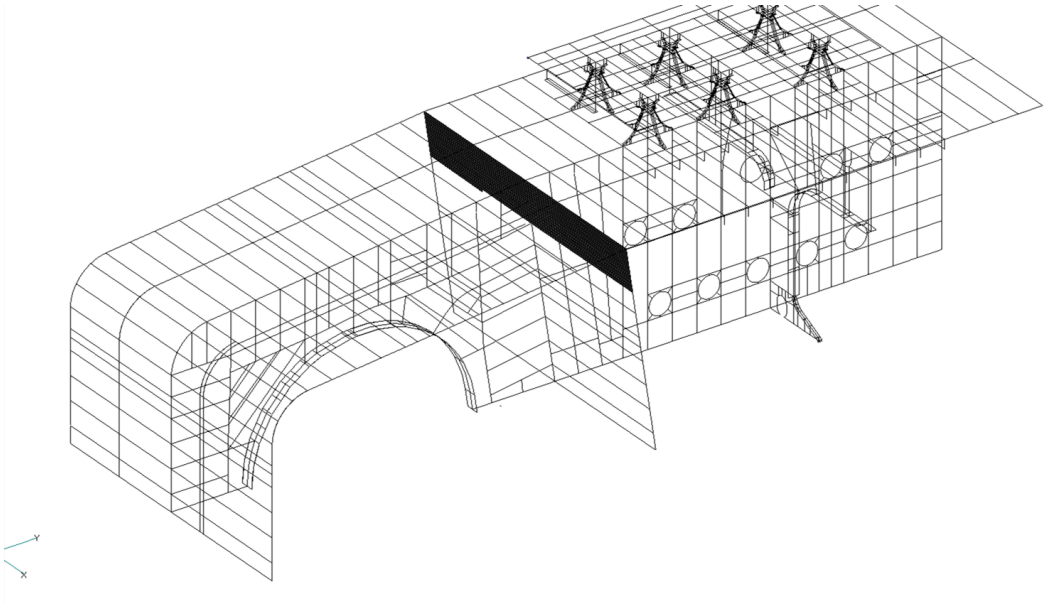


Figura 79: Propriedade 35

Propriedade 36 - Placa 30mm

```
 Tipo PLACA            Color 94    Layer 33       Material AH36
#Elem 720
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 29.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

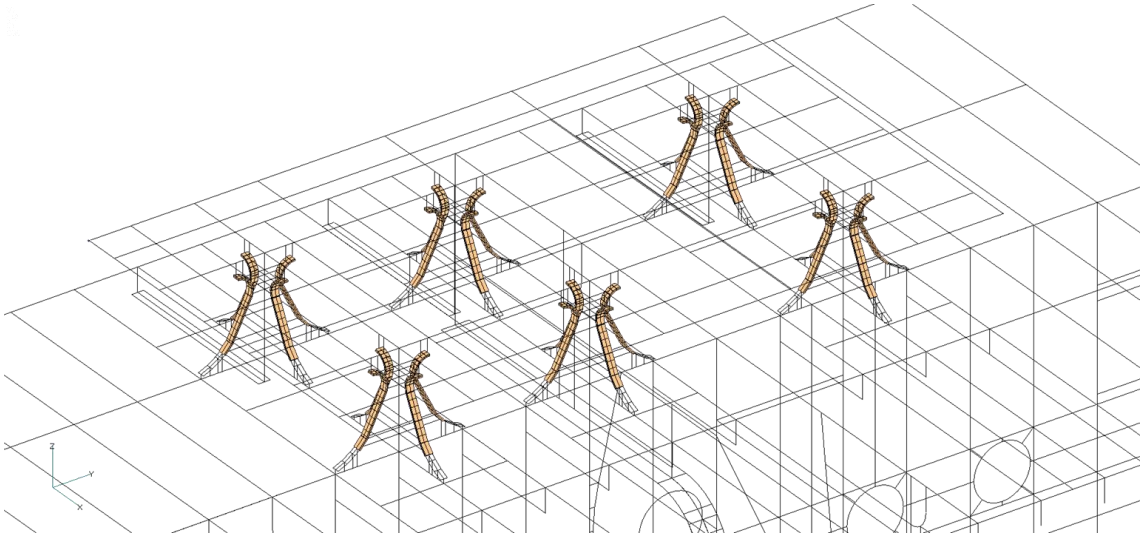


Figura 80: Propriedade 36

Propriedade 37 - Placa Stool 36 mm

```
 Tipo PLACA          Color 32    Layer 1        Material AH36
#Elem 461
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 35.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

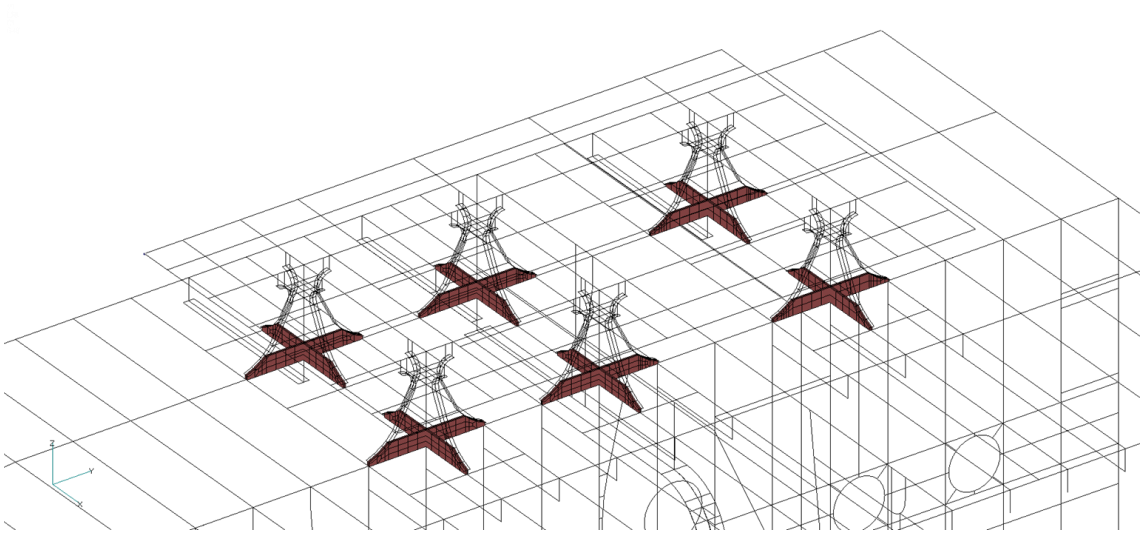


Figura 81: Propriedade 37

Propriedade 38 - Placa Flange Stool 36 mm

```
 Tipo PLACA          Color 7     Layer 300      Material AH36
#Elem 180
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 35.             Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

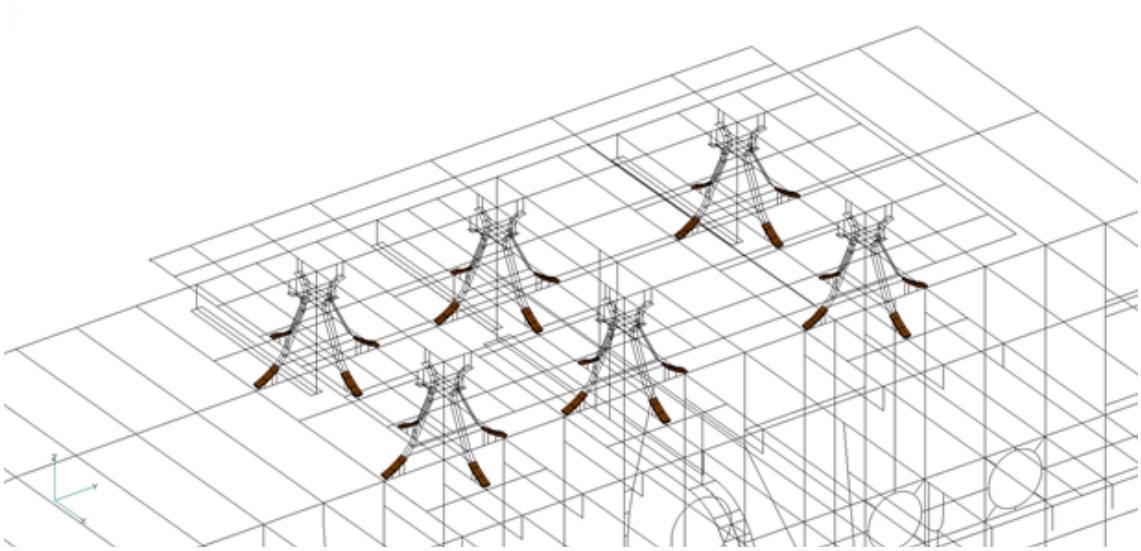


Figura 82: Propriedade 38

Propriedade 39 - Placa 22,5

```
 Tipo PLACA            Color 91    Layer 700      Material AH36
#Elem 207
 Bending Matl 0          TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 20.            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.         12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

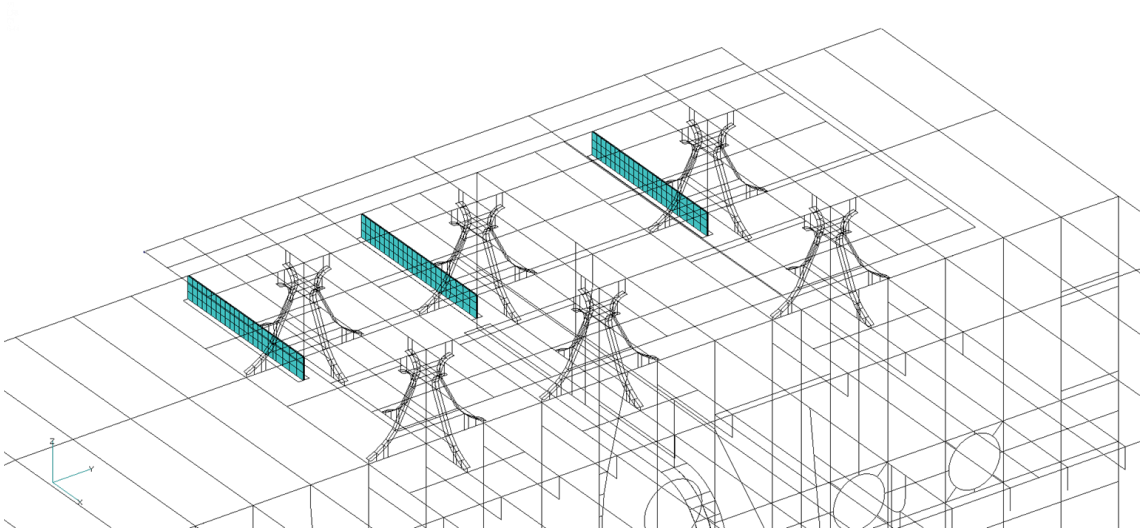


Figura 83: Propriedade 39

Propriedade 40 - Placa 150x35

```
 Tipo PLACA            Color 92    Layer 700      Material AH36
#Elem 138
 Bending Matl 0            TrShear Matl 0            CouplingMatl 0
 Espessura 32,5            Top Fiber 0.              Bot Fiber 0.
 NS Mass/Area 0.           12I/T**3 0.               Tshear/T 0.
```

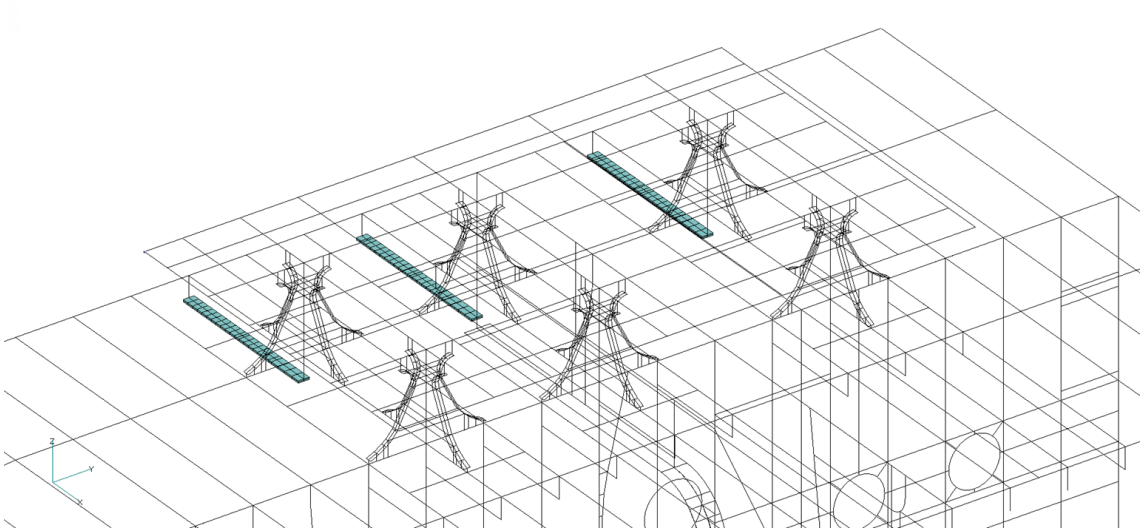


Figura 84: Propriedade 40

ANEXO II: *Resultados de tensão*

- Resultados de tensão para a estrutura do convés

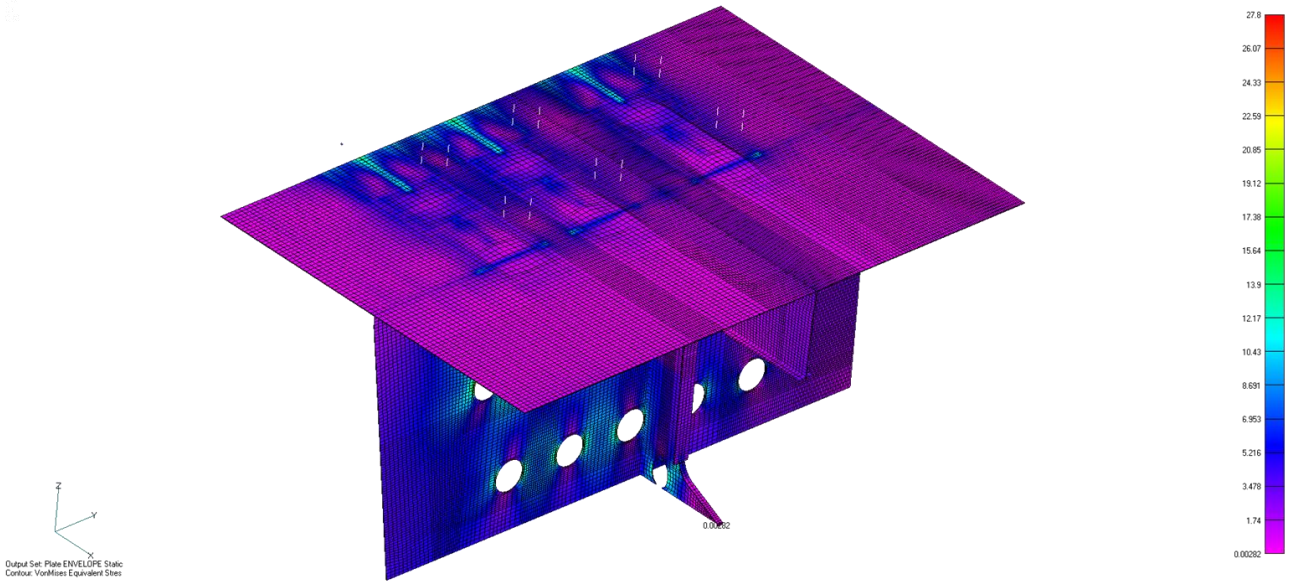


Figura 85: Tensão equivalente de von Mises para STATIC ENVELOPE

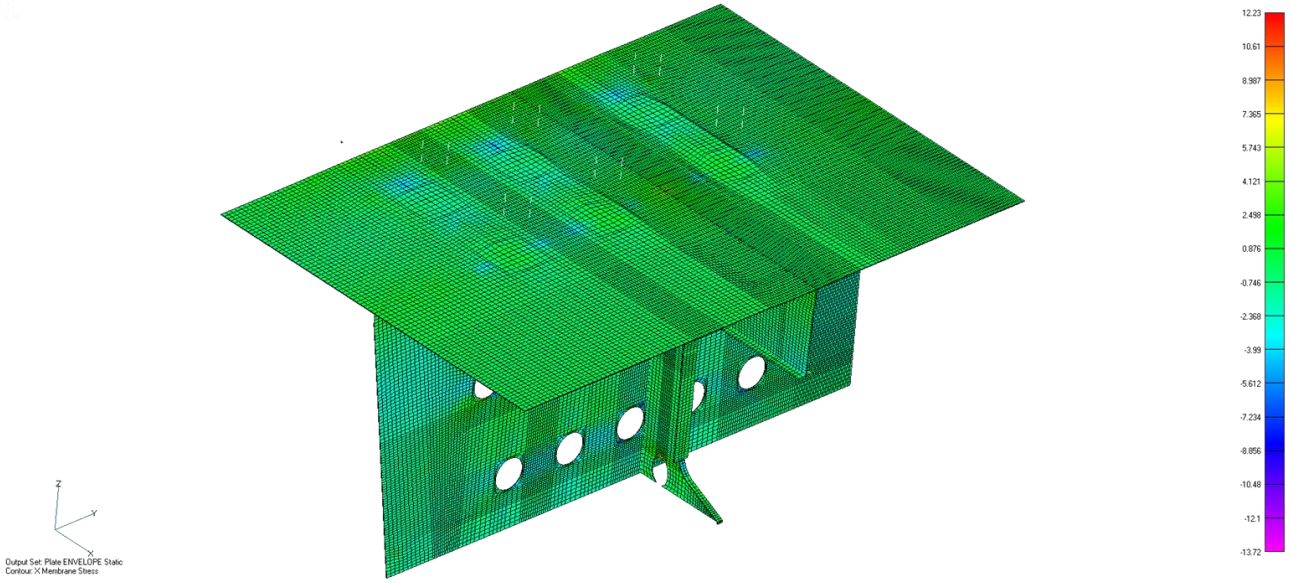


Figura 86: Tensão longitudinal de membrana para STATIC ENVELOPE

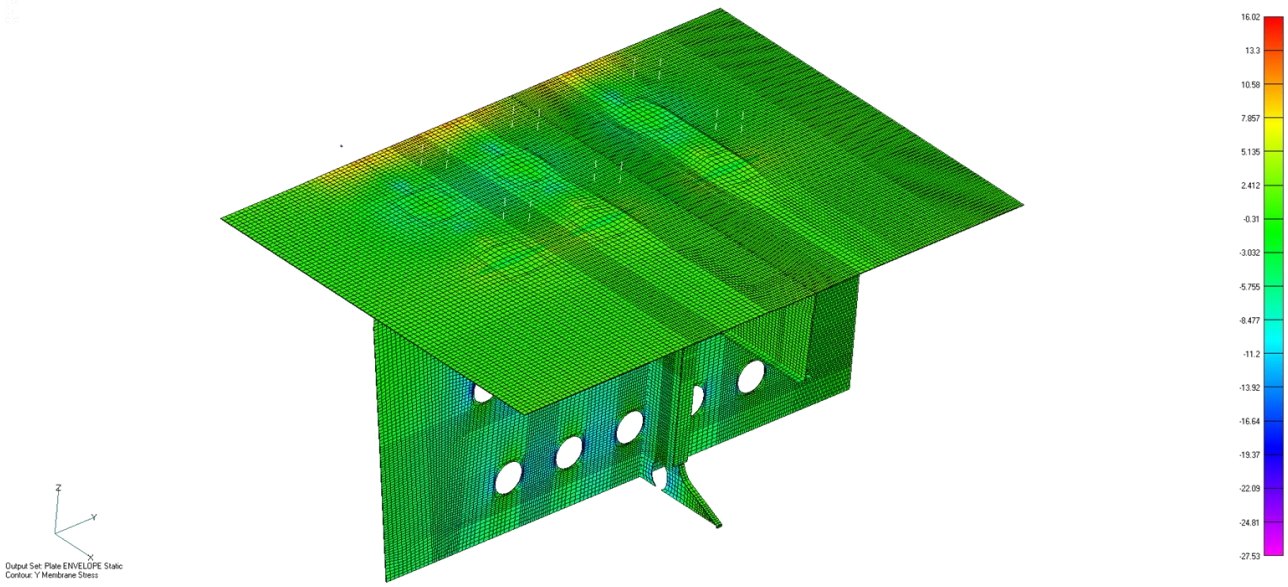


Figura 87: Tensão transversal de membrana para STATIC ENVELOPE

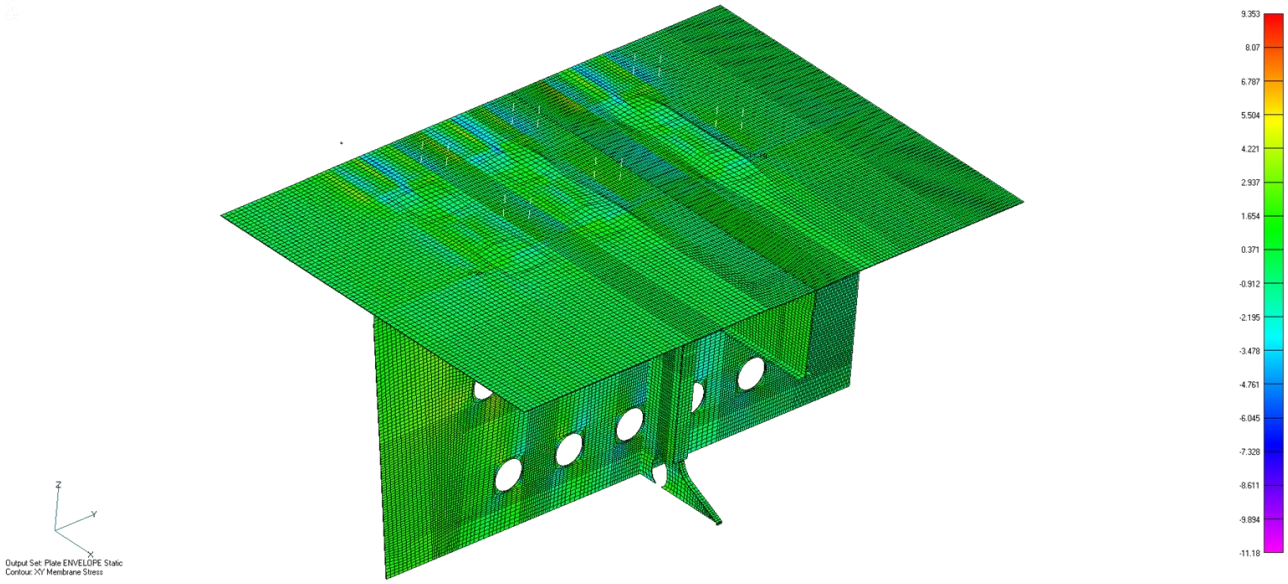


Figura 88: Tensão cisalhante para STATIC ENVELOPE

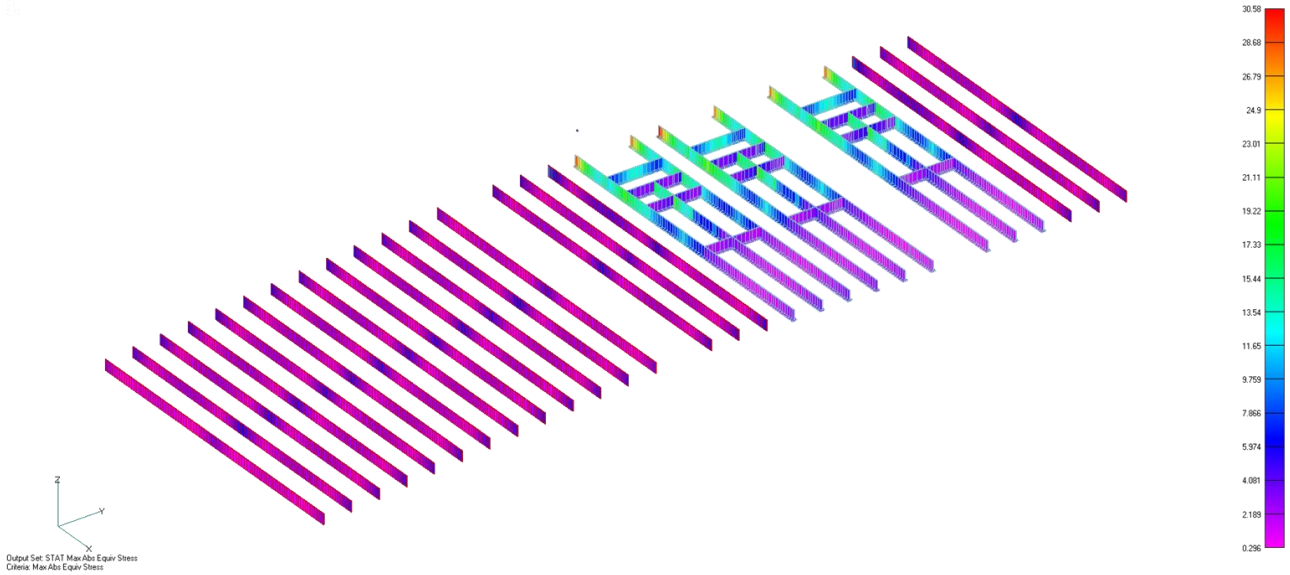


Figura 89: Máxima tensão combinada para STATIC ENVELOPE

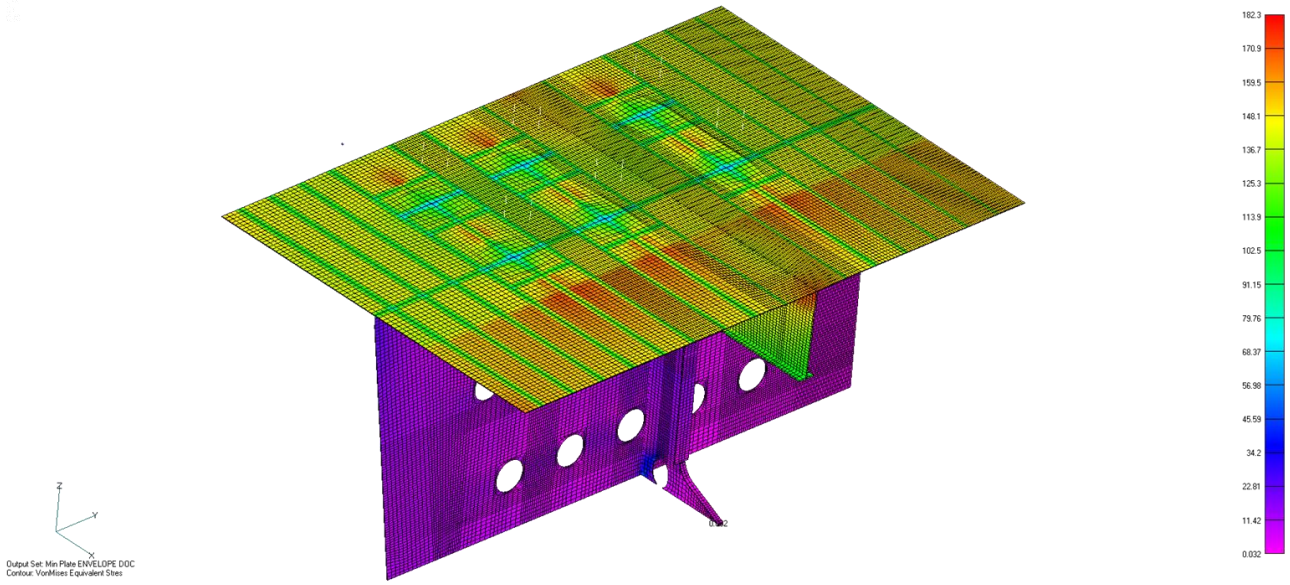


Figura 90: Tensão equivalente de von Mises para DOC ENVELOPE

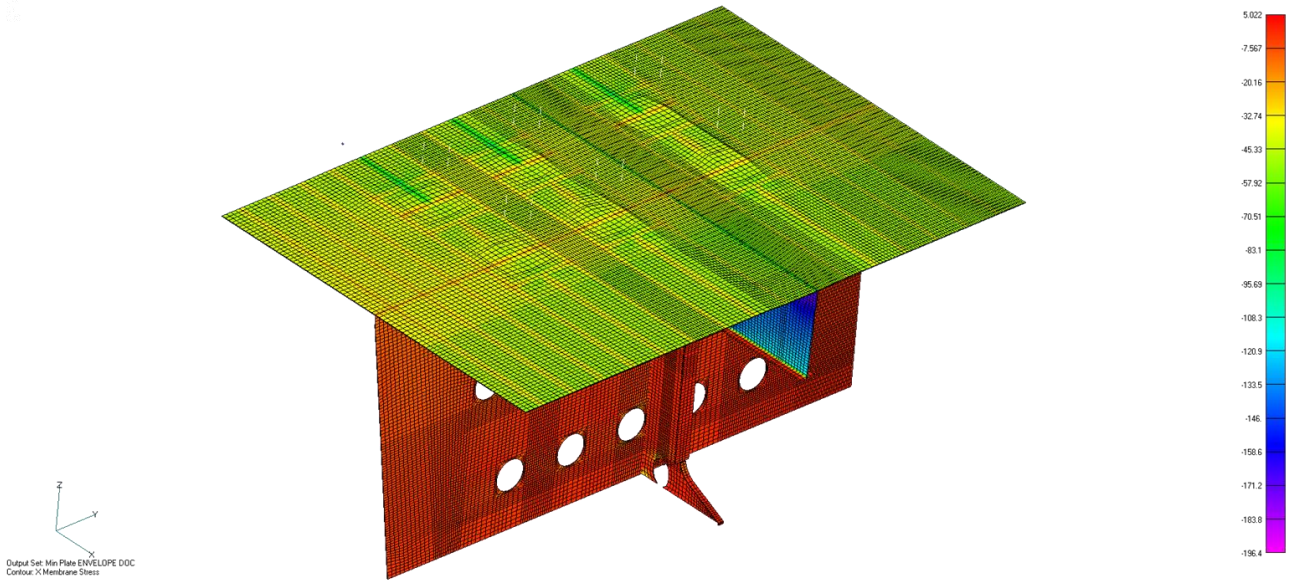


Figura 91: Tensão longitudinal mínima de membrana para DOC ENVELOPE

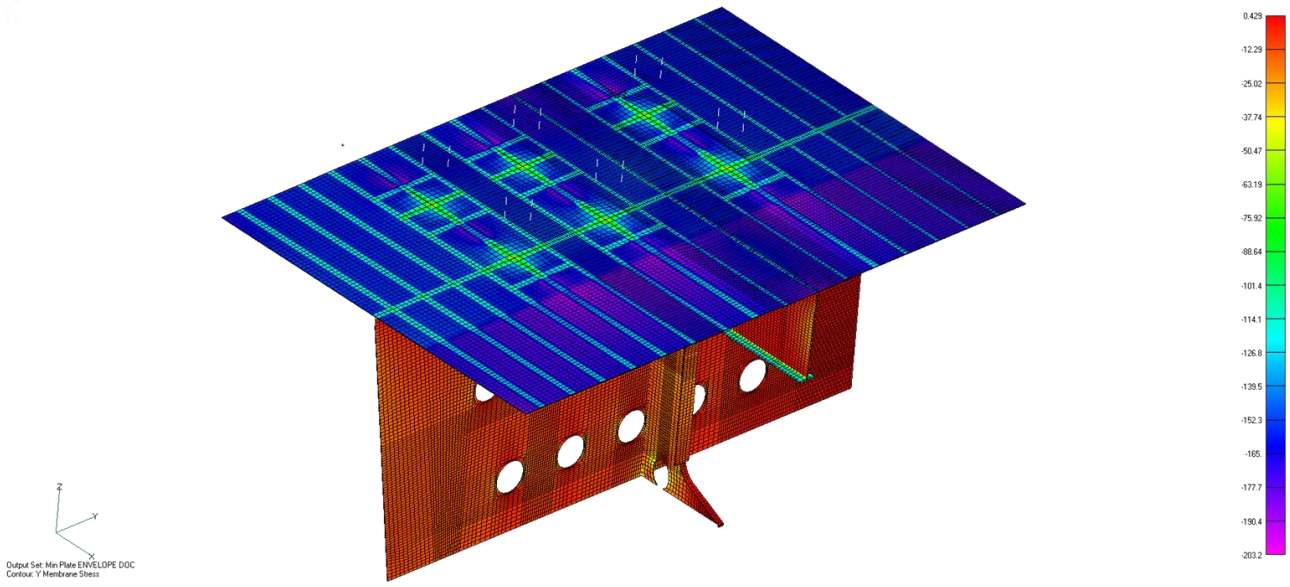


Figura 92: Tensão transversal mínima de membrana para DOC ENVELOPE

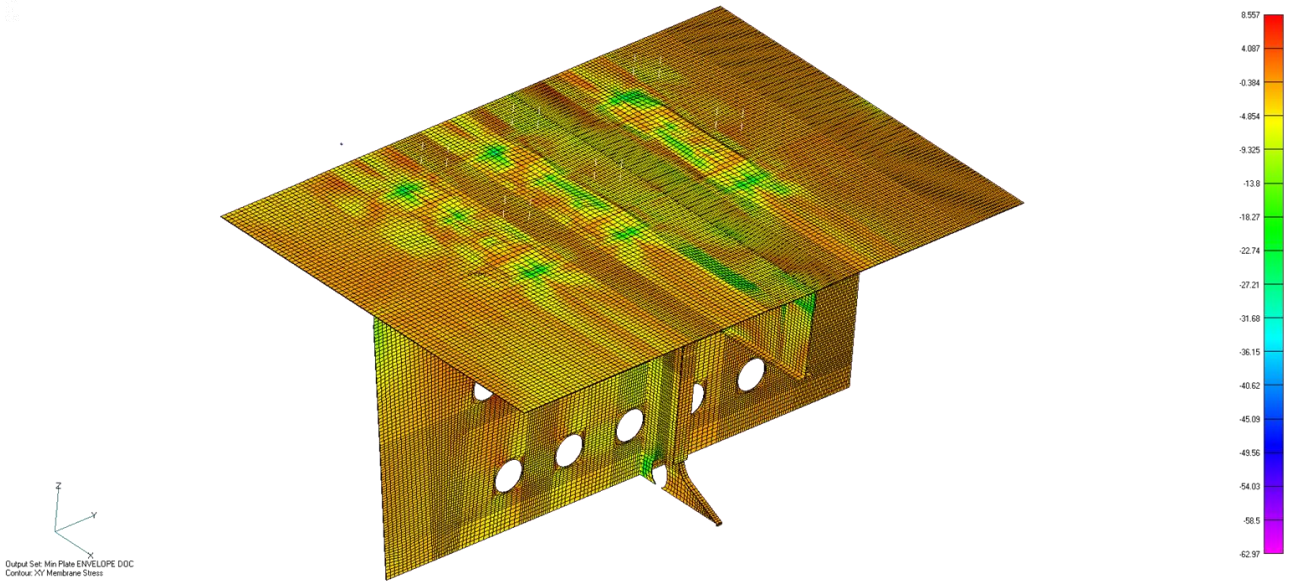


Figura 93: Tensão cisalhante mínima para DOC ENVELOPE

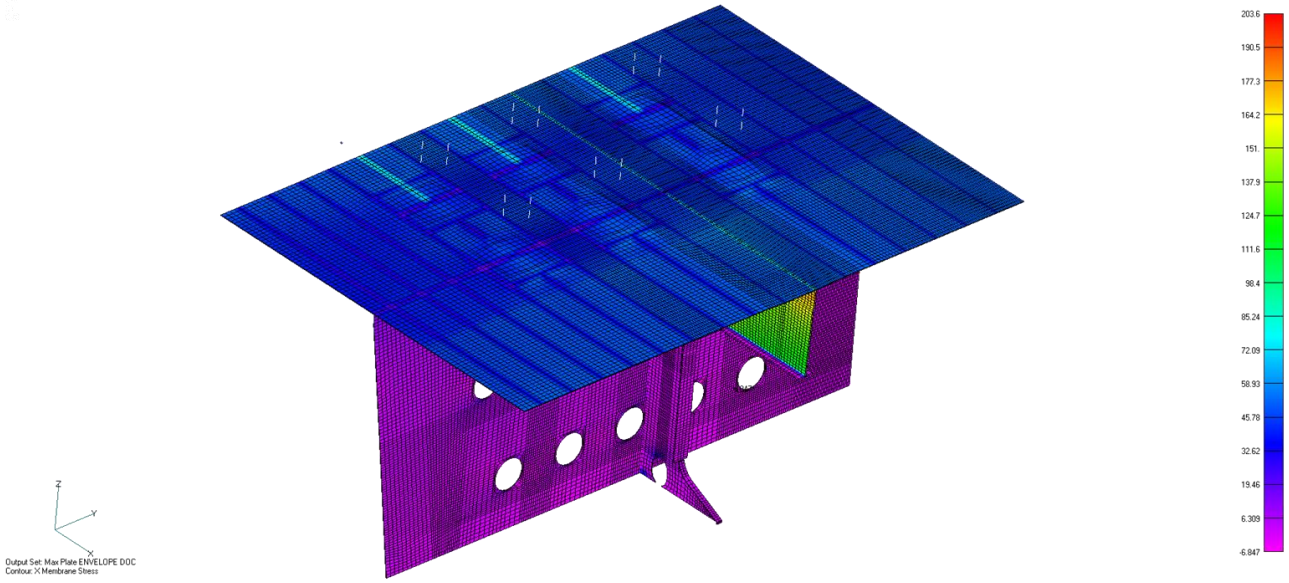


Figura 94: Tensão longitudinal máxima de membrana para DOC ENVELOPE

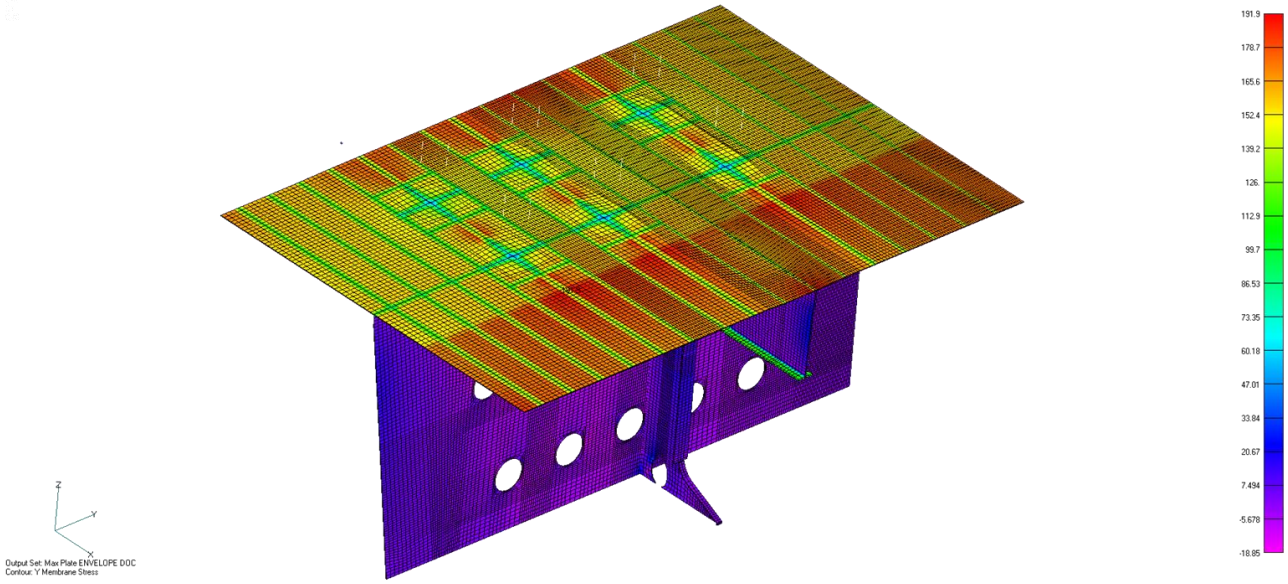


Figura 95: Tensão transversal máxima de membrana para DOC ENVELOPE

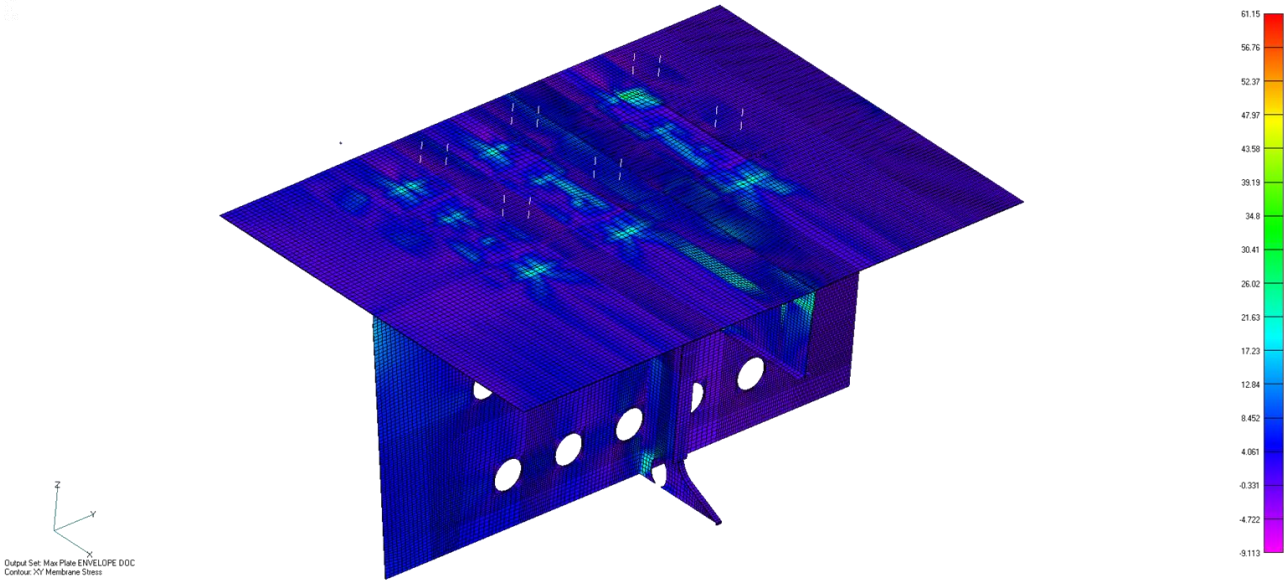


Figura 96: Tensão cisalhante máxima para DOC ENVELOPE

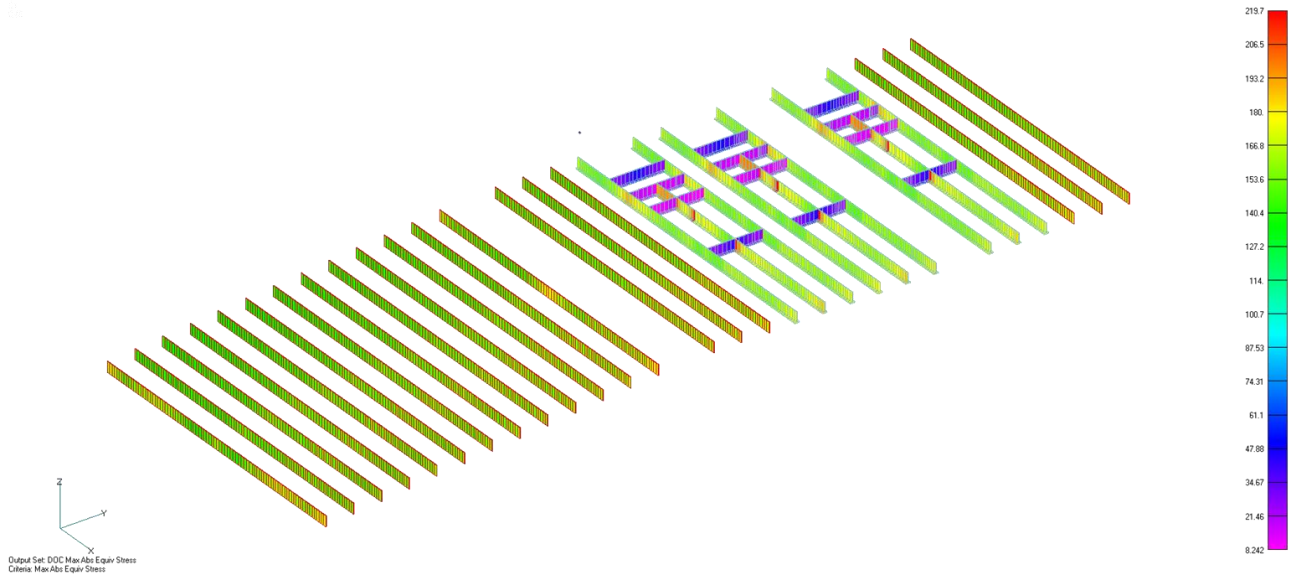


Figura 97: Máxima tensão combinada para DOC ENVELOPE

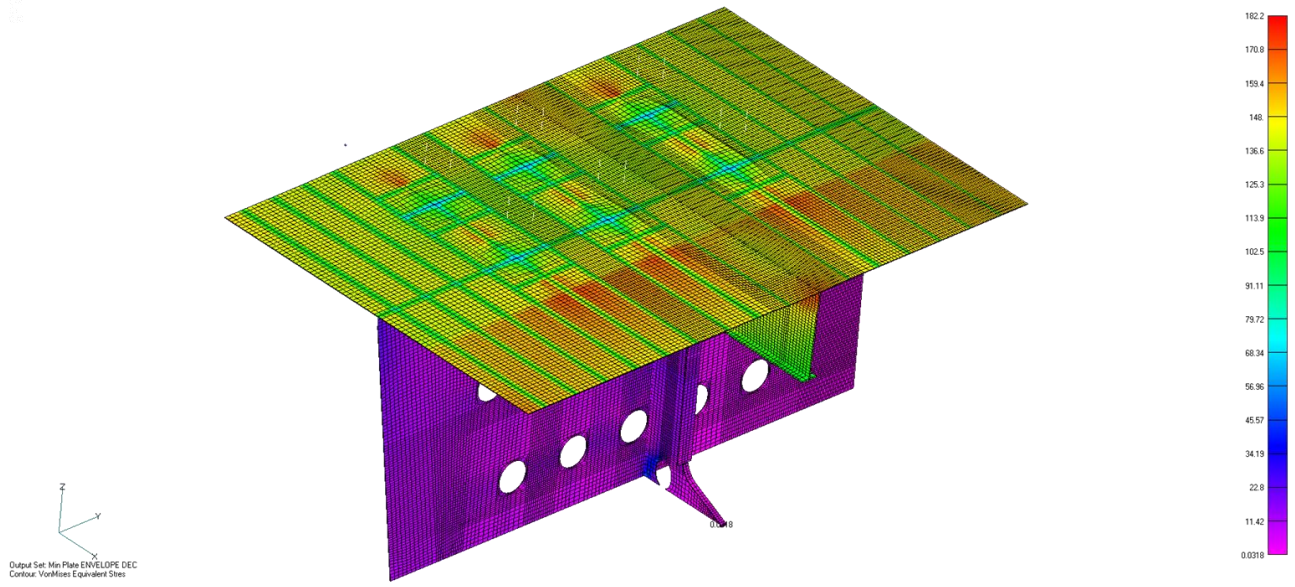


Figura 98: Tensão equivalente de von Mises para DEC ENVELOPE

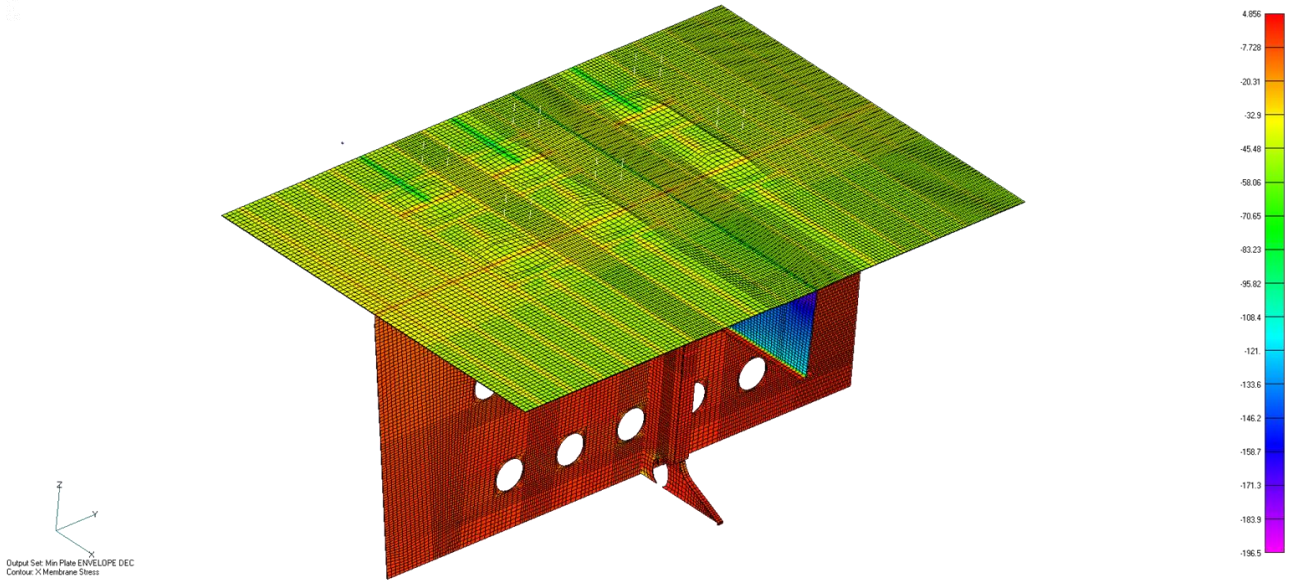


Figura 99: Tensão longitudinal mínima de membrana para DEC ENVELOPE

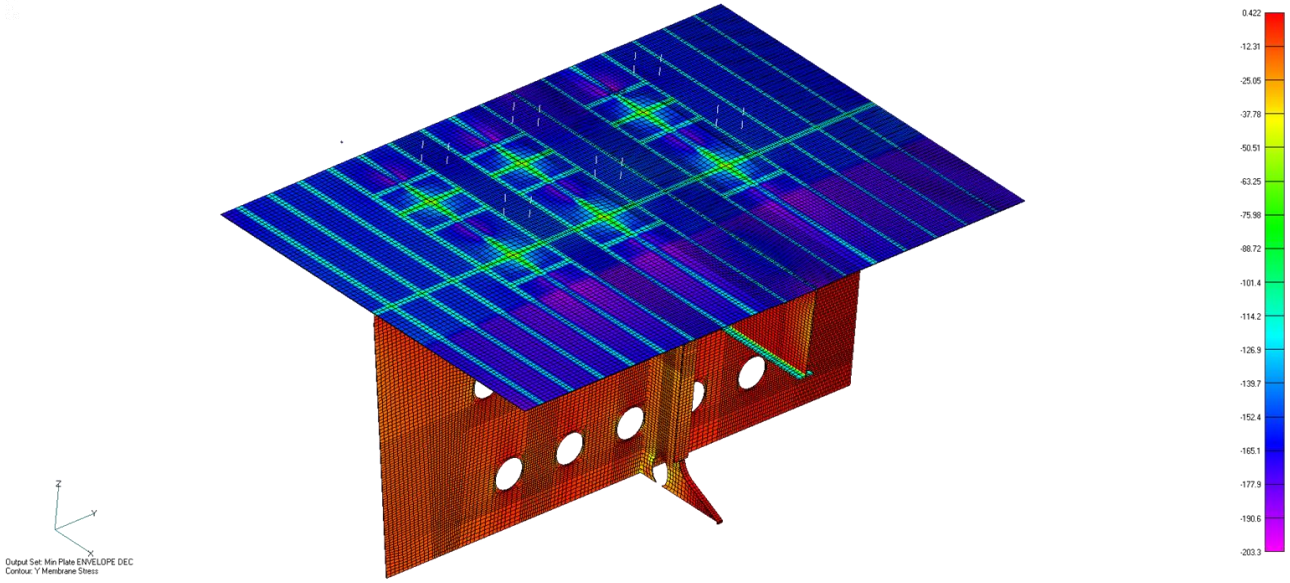


Figura 100: Tensão transversal mínima de membrana para DEC ENVELOPE

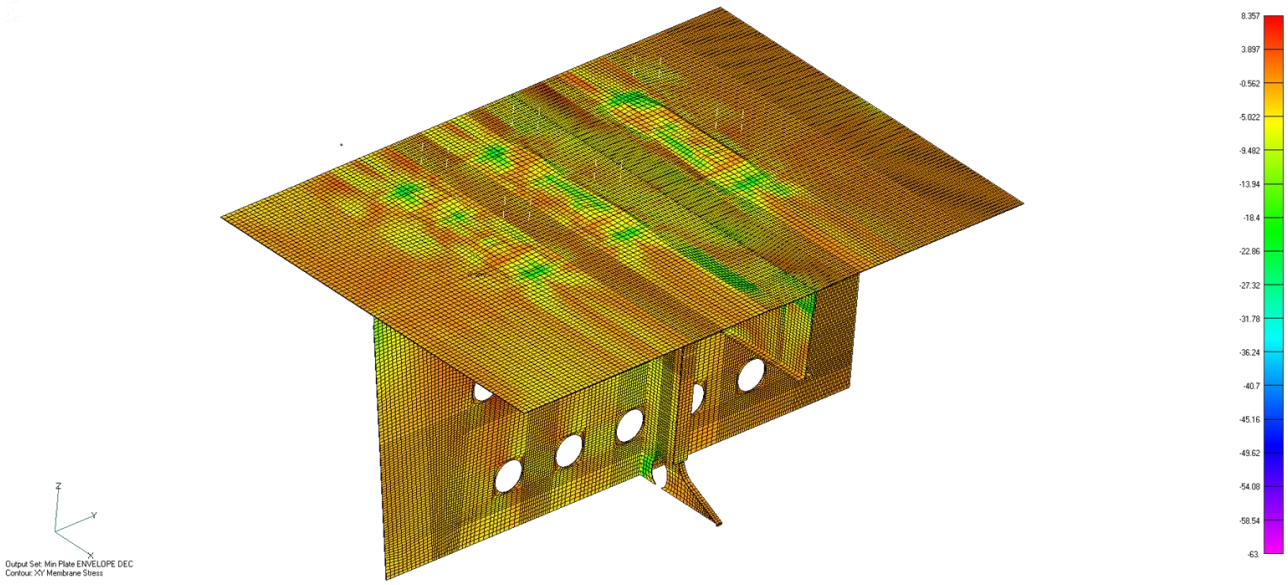


Figura 101: Tensão cisalhante mínima para DEC ENVELOPE

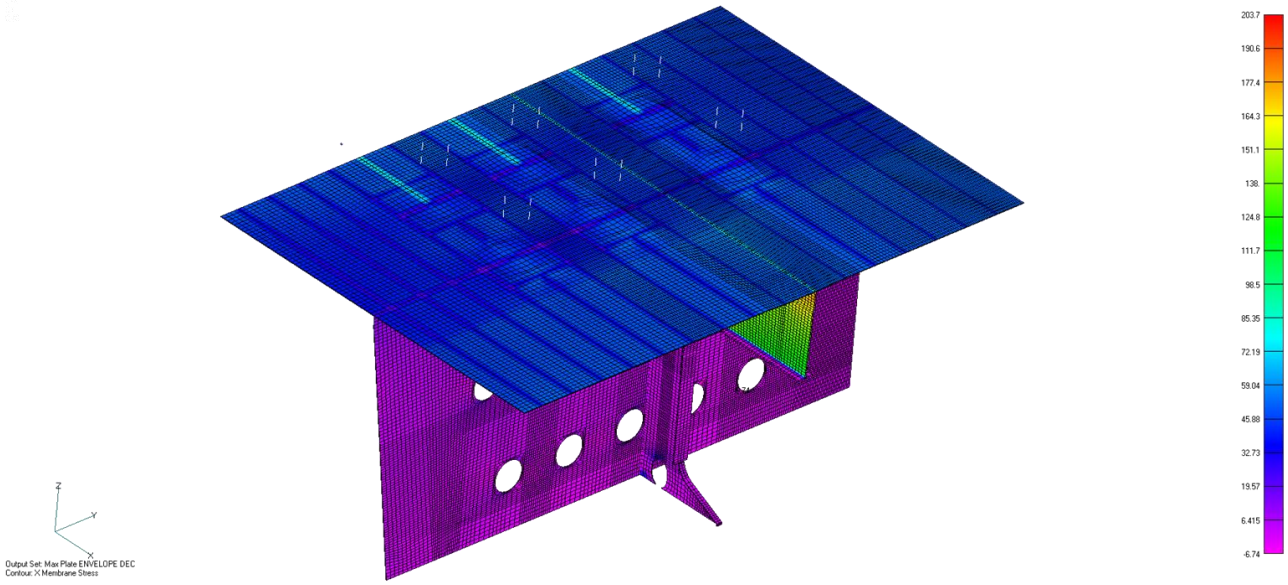


Figura 102: Tensão longitudinal máxima de membrana para DEC ENVELOPE

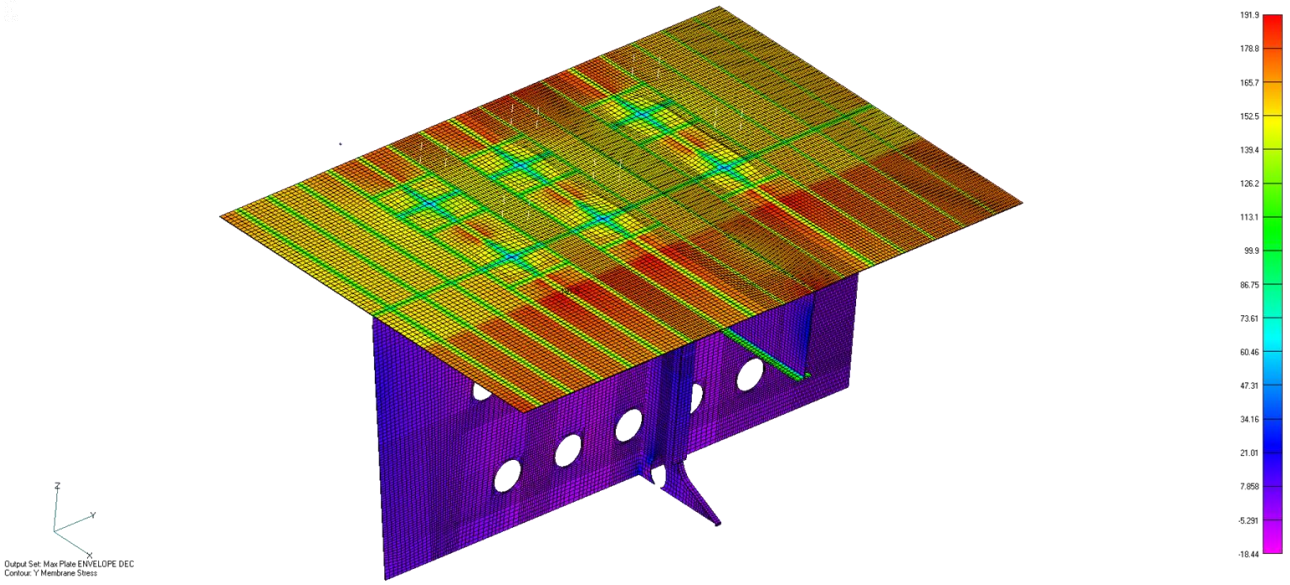


Figura 103: Tensão transversal máxima de membrana para DEC ENVELOPE

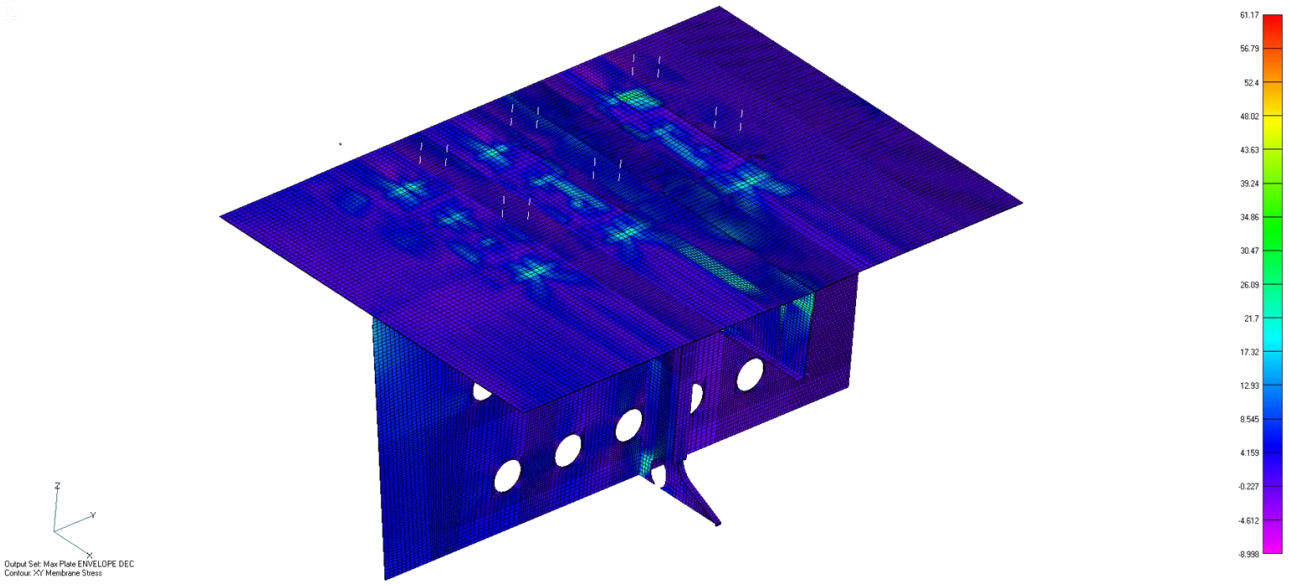


Figura 104: Tensão cisalhante máxima para DEC ENVELOPE

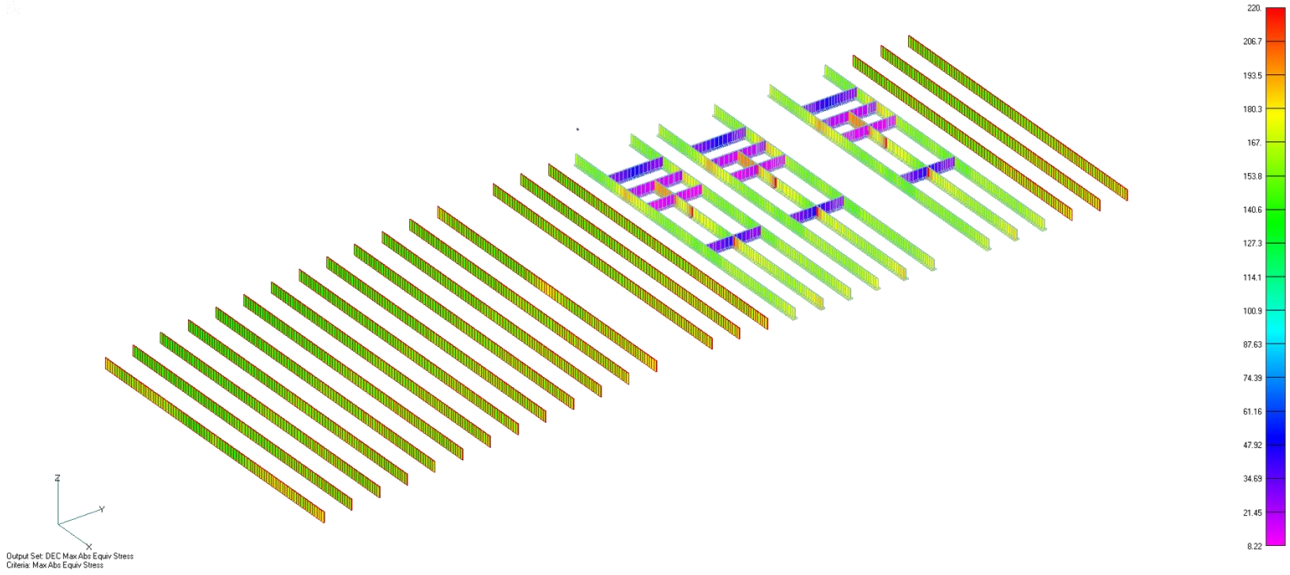


Figura 105: Máxima tensão combinada para DEC ENVELOPE

- Resultados de tensão para a *laydown area*

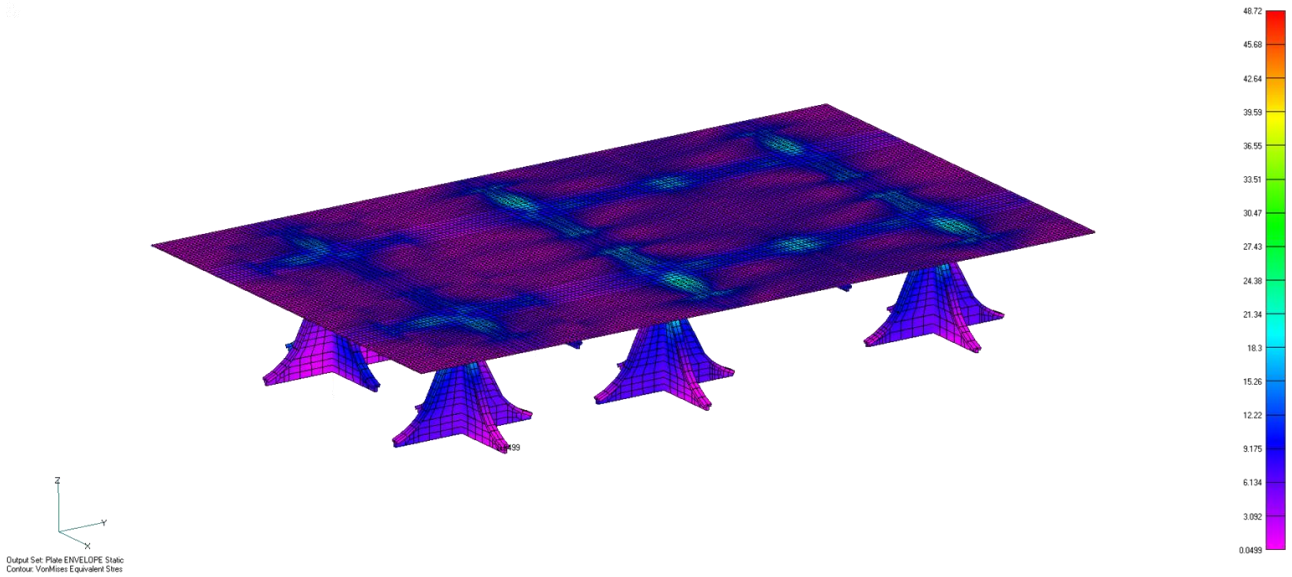


Figura 106: Tensão equivalente de von Mises para STATIC ENVELOPE

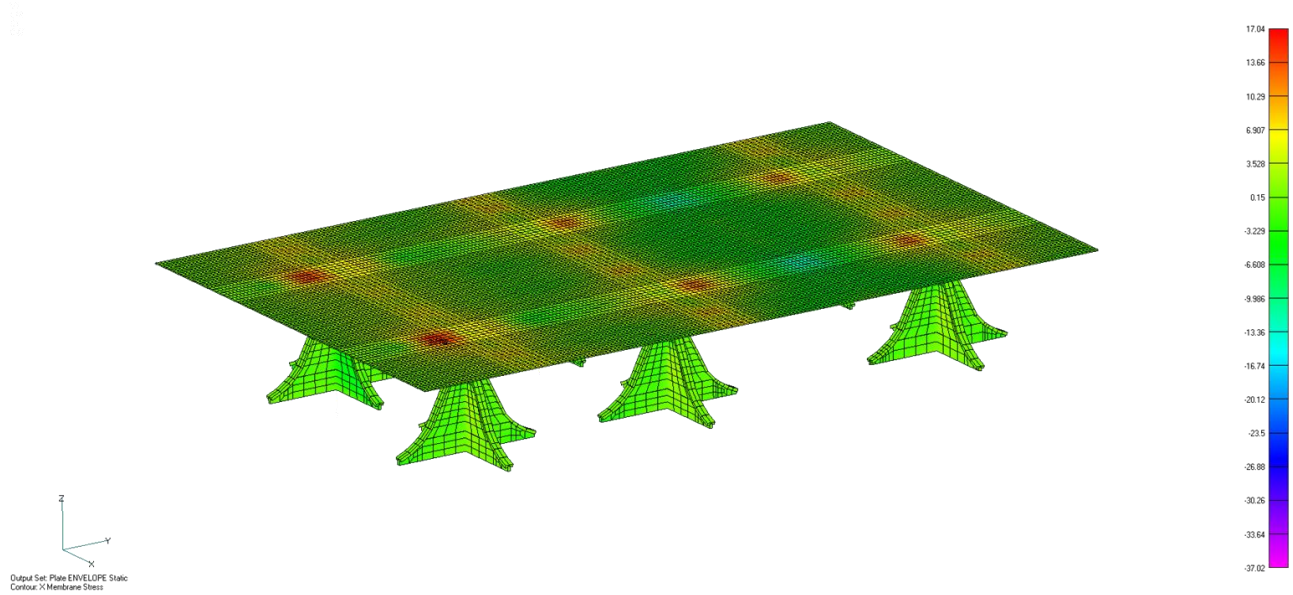


Figura 107: Tensão longitudinal de membrana para STATIC ENVELOPE

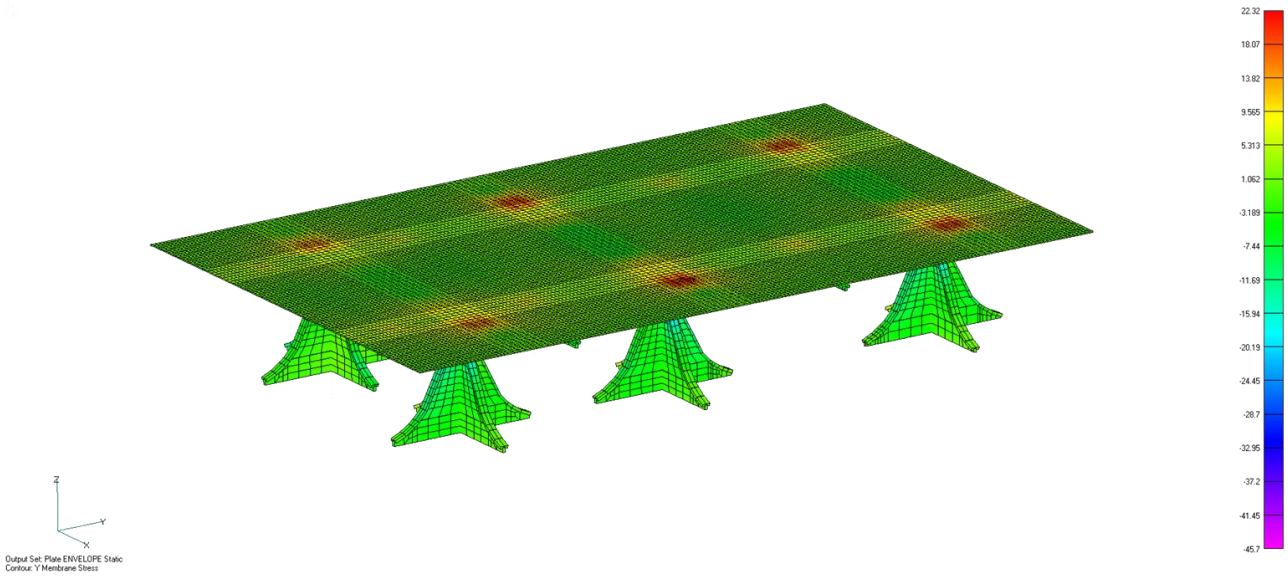


Figura 108: Tensão transversal de membrana para STATIC ENVELOPE

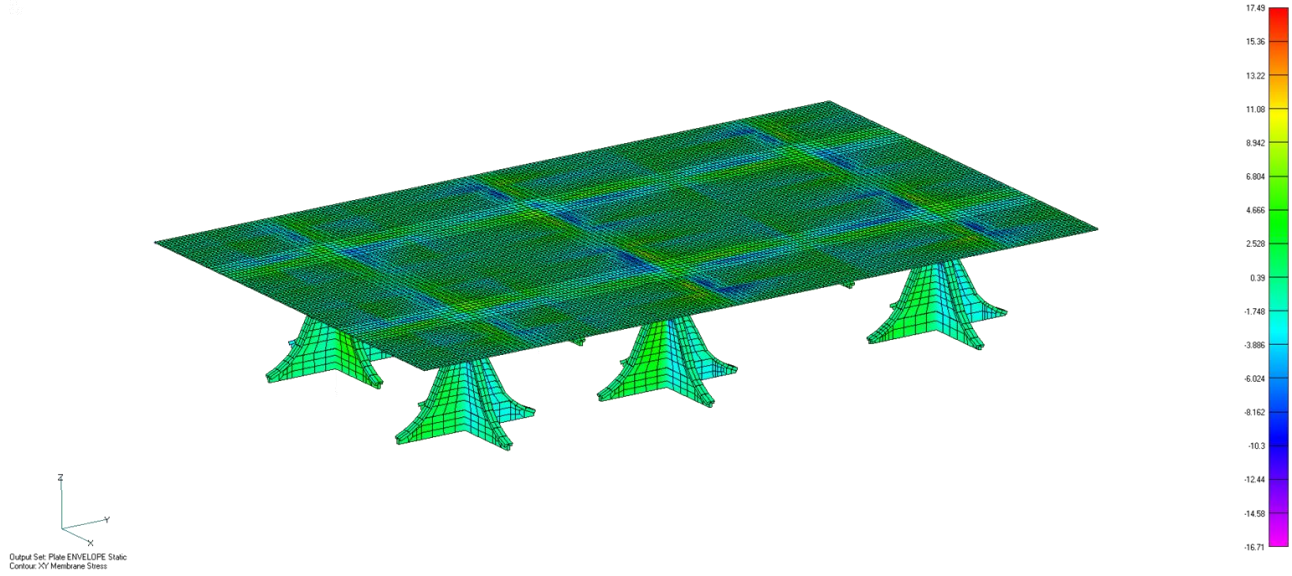


Figura 109: Tensão cisalhante para STATIC ENVELOPE

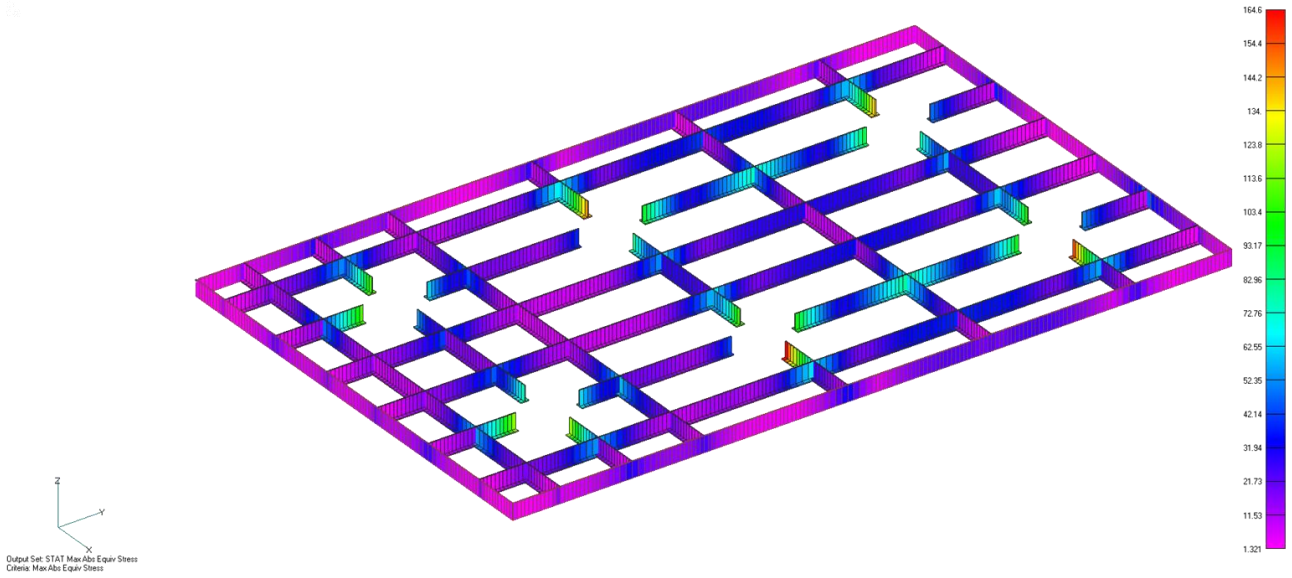


Figura 110: Máxima tensão combinada para STATIC ENVELOPE

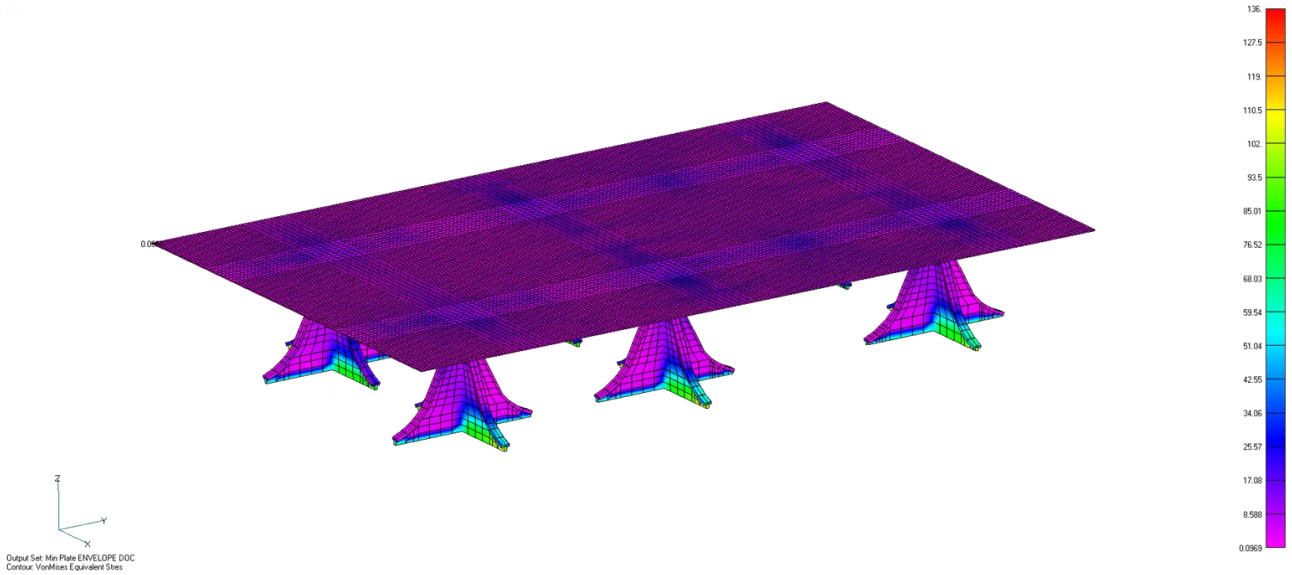


Figura 111: Tensão equivalente de von Mises para DOC ENVELOPE

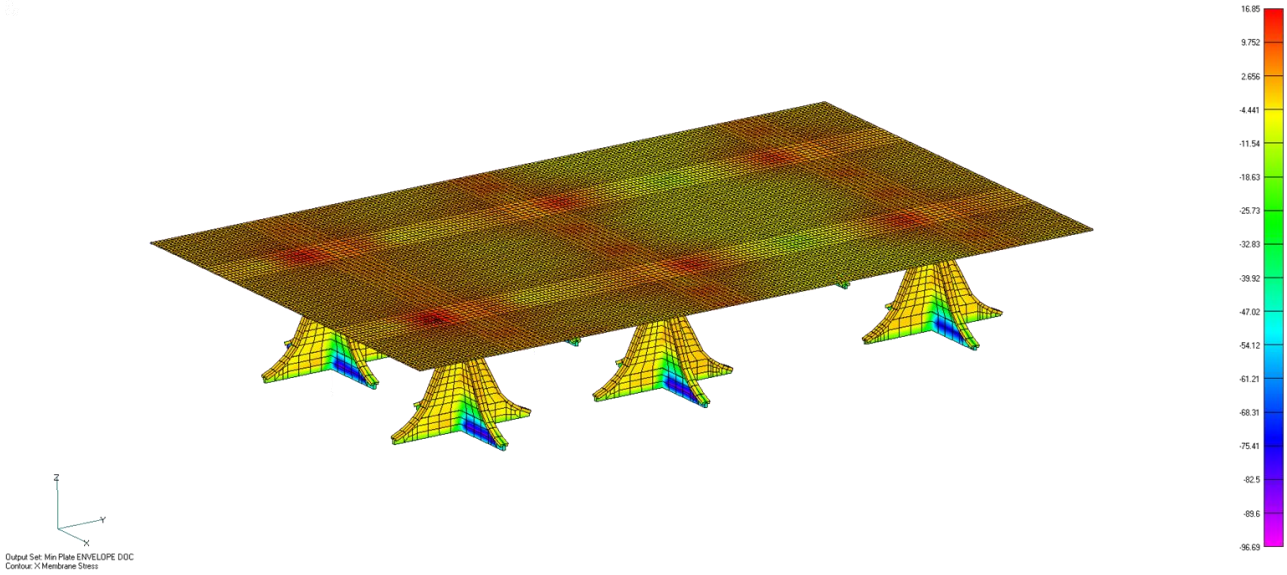


Figura 112: Tensão longitudinal mínima de membrana para DOC ENVELOPE

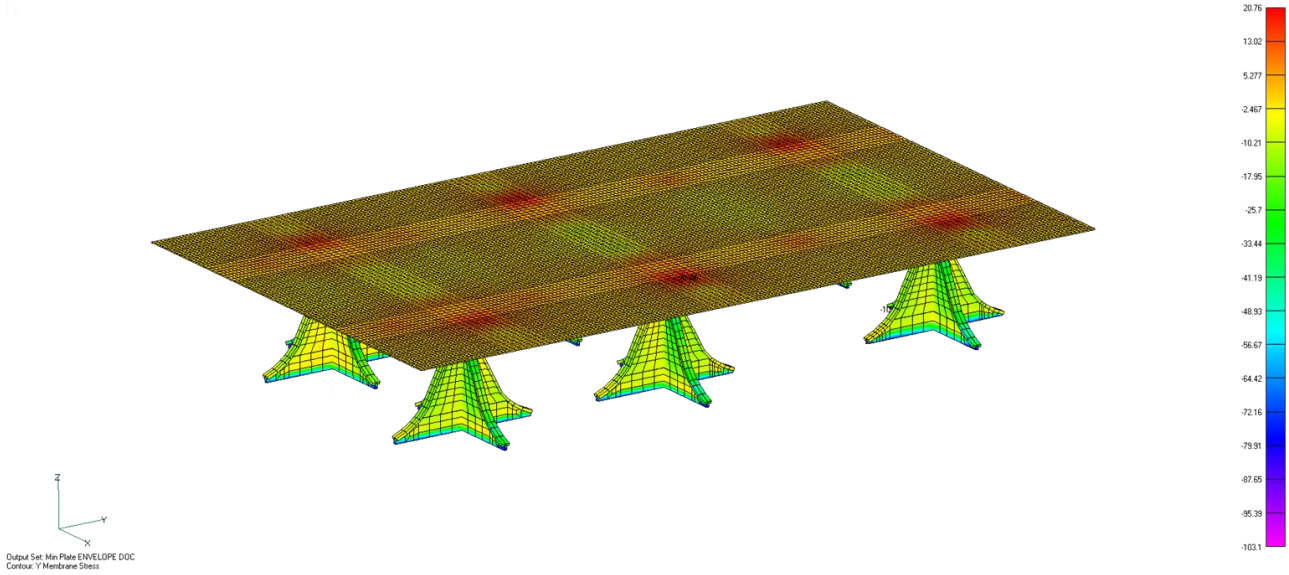


Figura 113: Tensão transversal mínima de membrana para DOC ENVELOPE

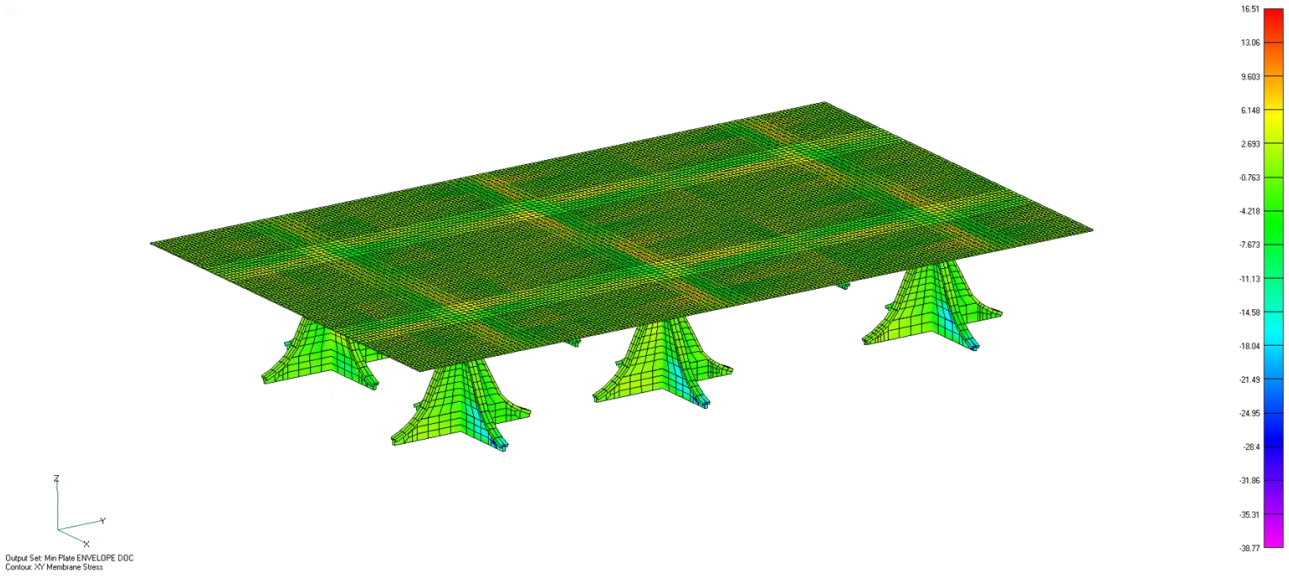


Figura 114: Tensão cisalhante mínima para DOC ENVELOPE

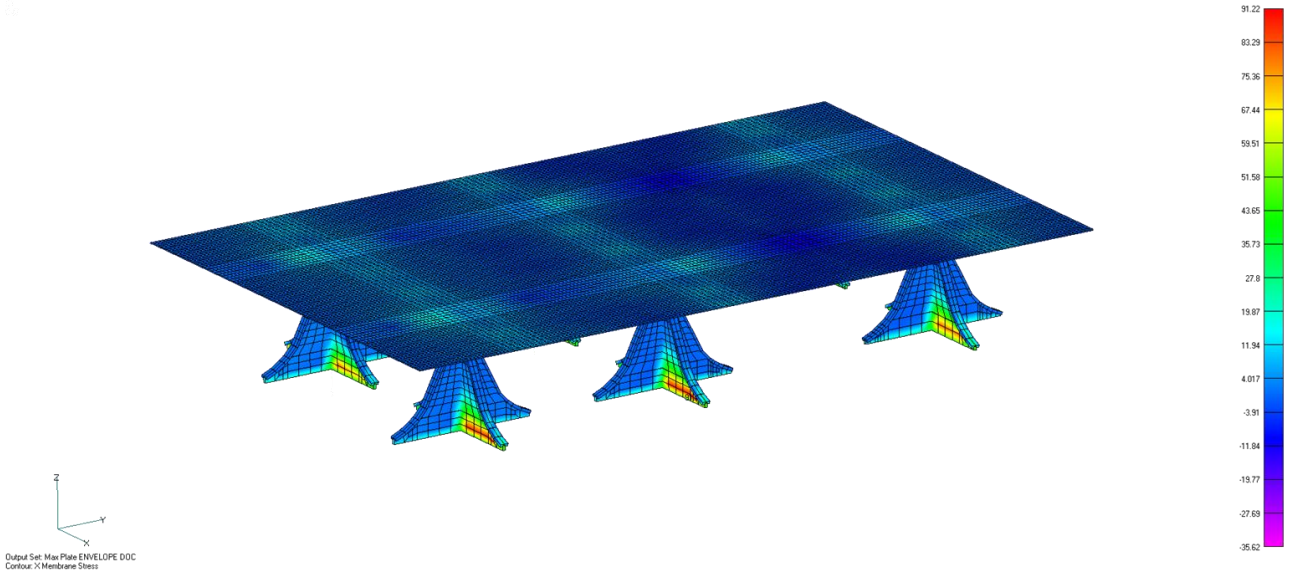


Figura 115: Tensão longitudinal máxima de membrana para DOC ENVELOPE

:

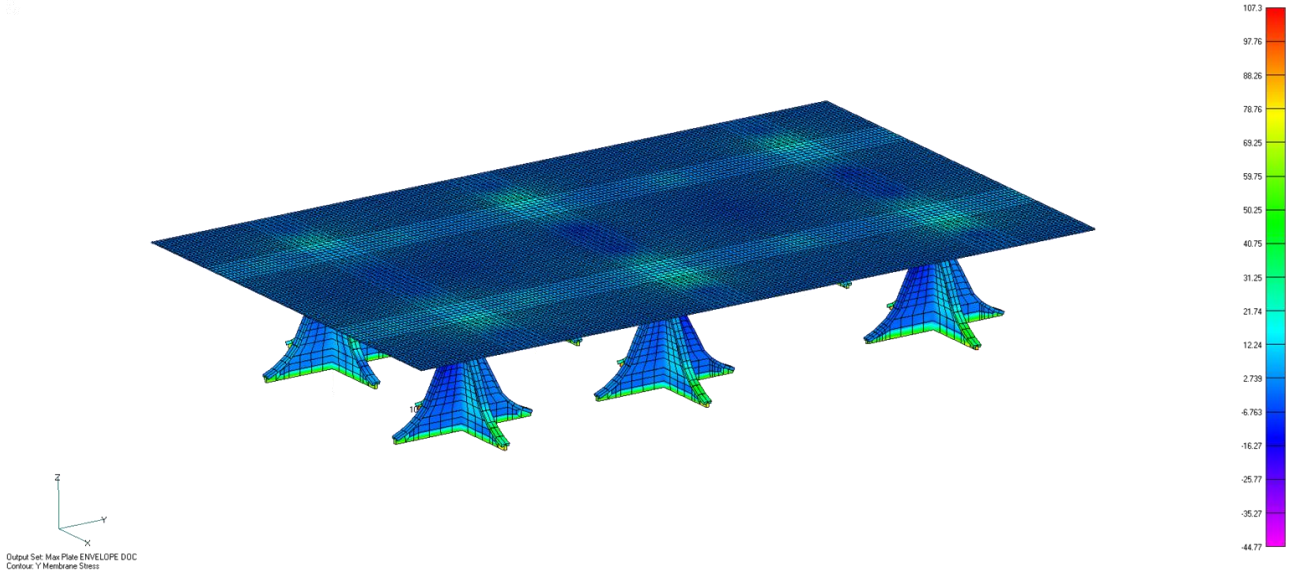


Figura 116: Tensão transversal máxima de membrana para DOC ENVELOPE

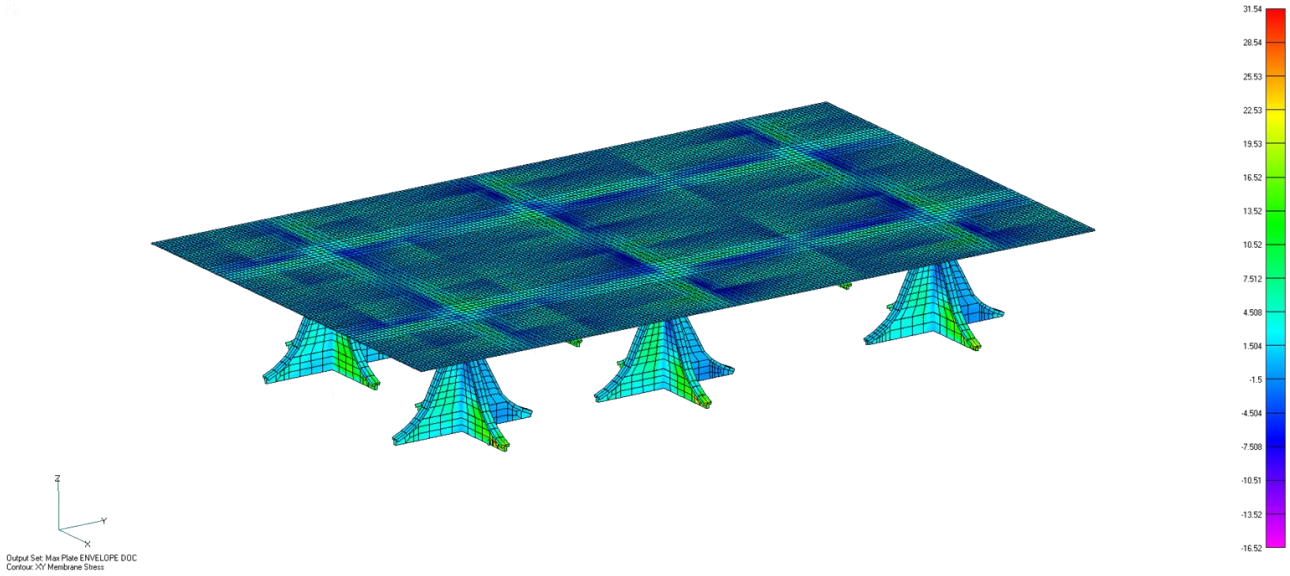


Figura 117: Tensão cisalhante máxima para DOC ENVELOPE

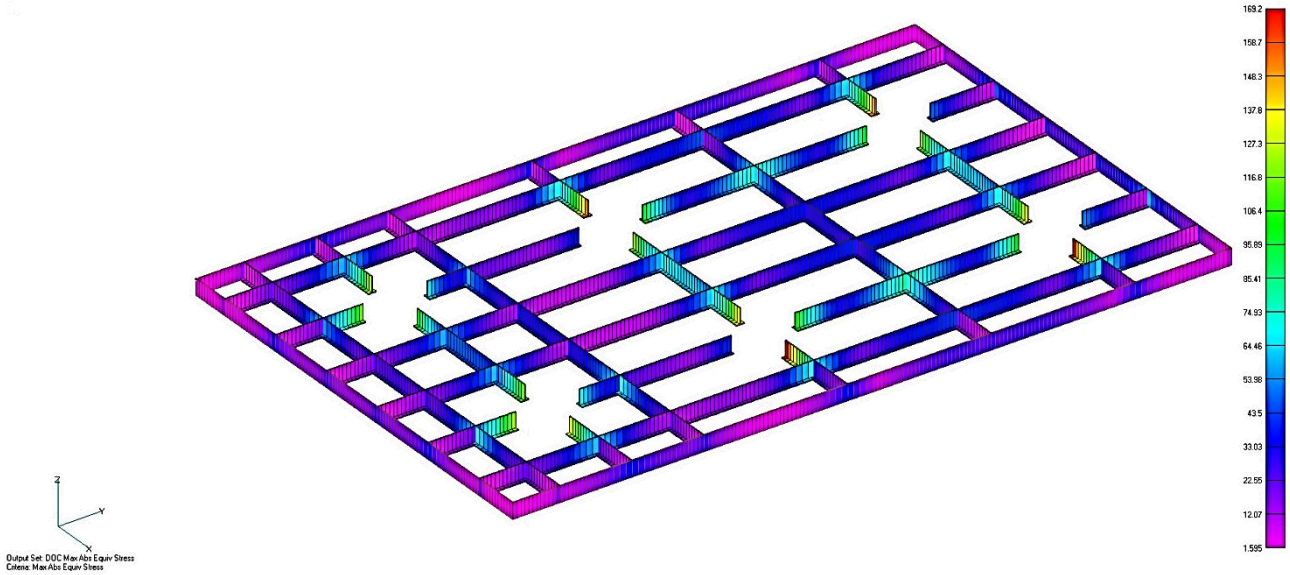


Figura 118: Máxima tensão combinada para DOC ENVELOPE

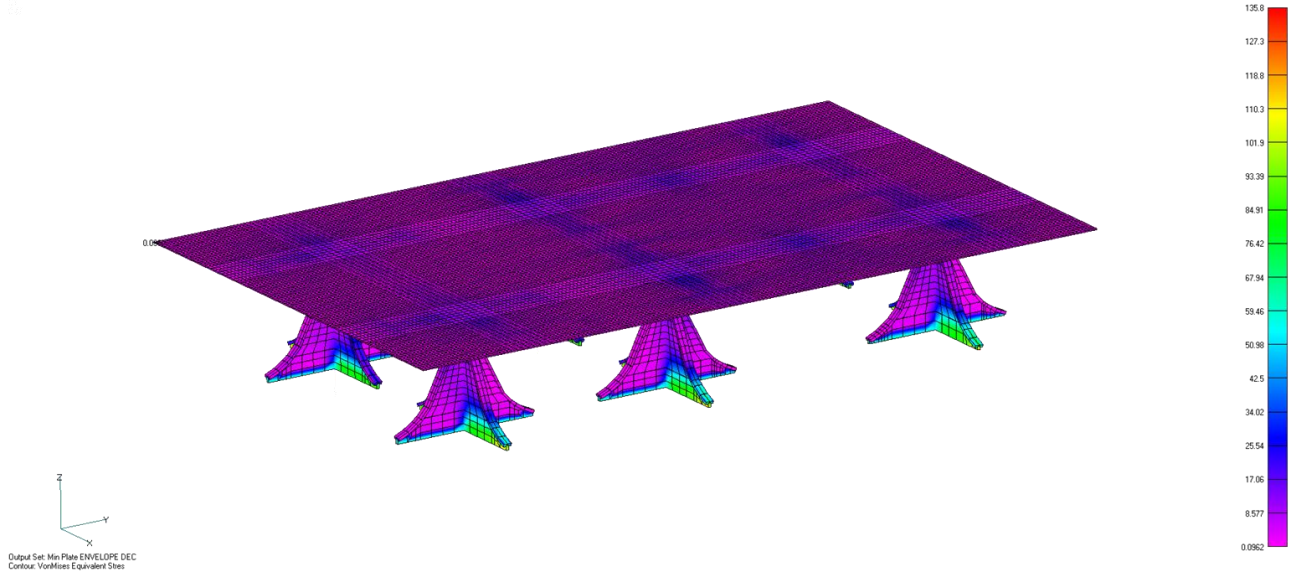


Figura 119: Tensão equivalente de von Mises para DEC ENVELOPE

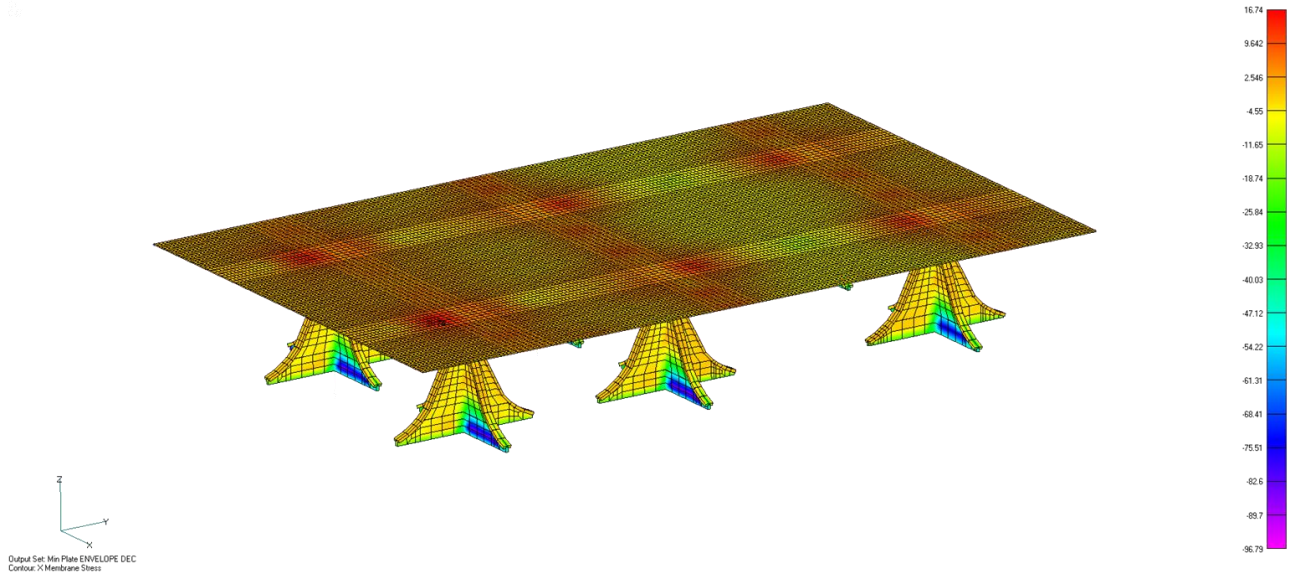


Figura 120: Tensão longitudinal mínima de membrana para DEC ENVELOPE

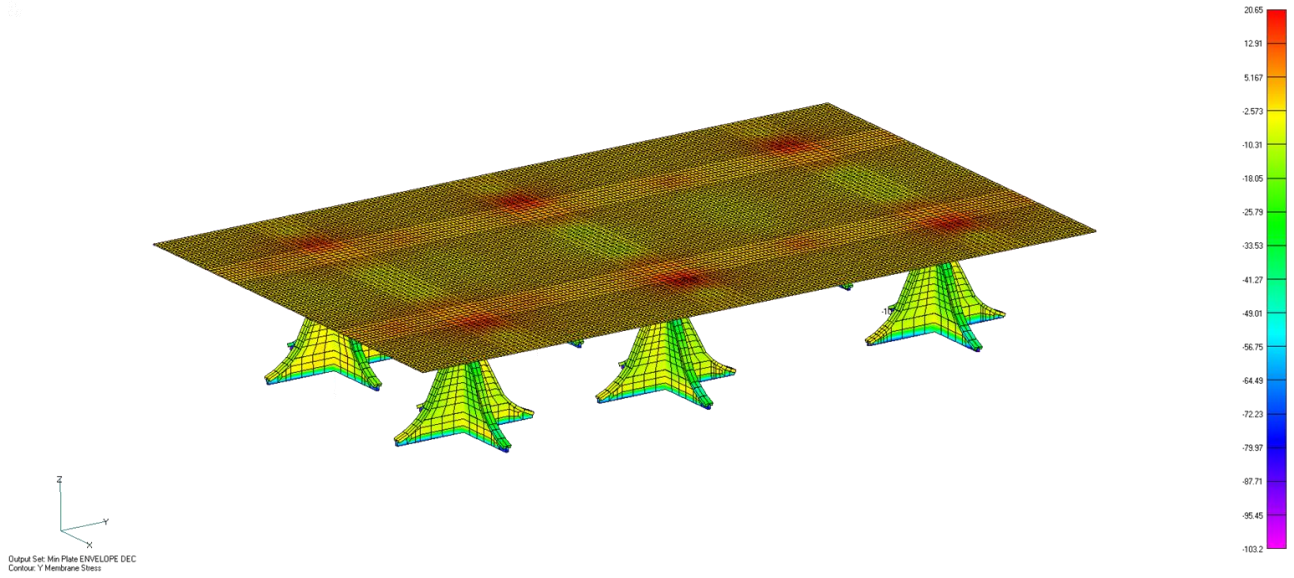


Figura 121: Tensão transversal mínima de membrana para DEC ENVELOPE

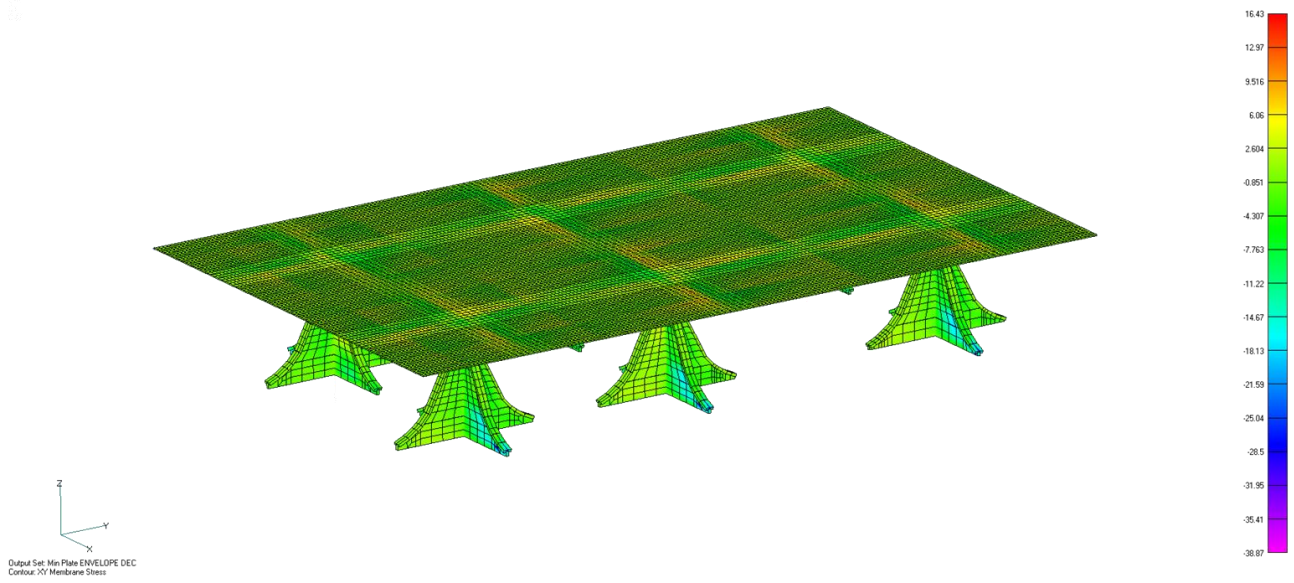


Figura 122: Tensão cisalhante mínima para DEC ENVELOPE

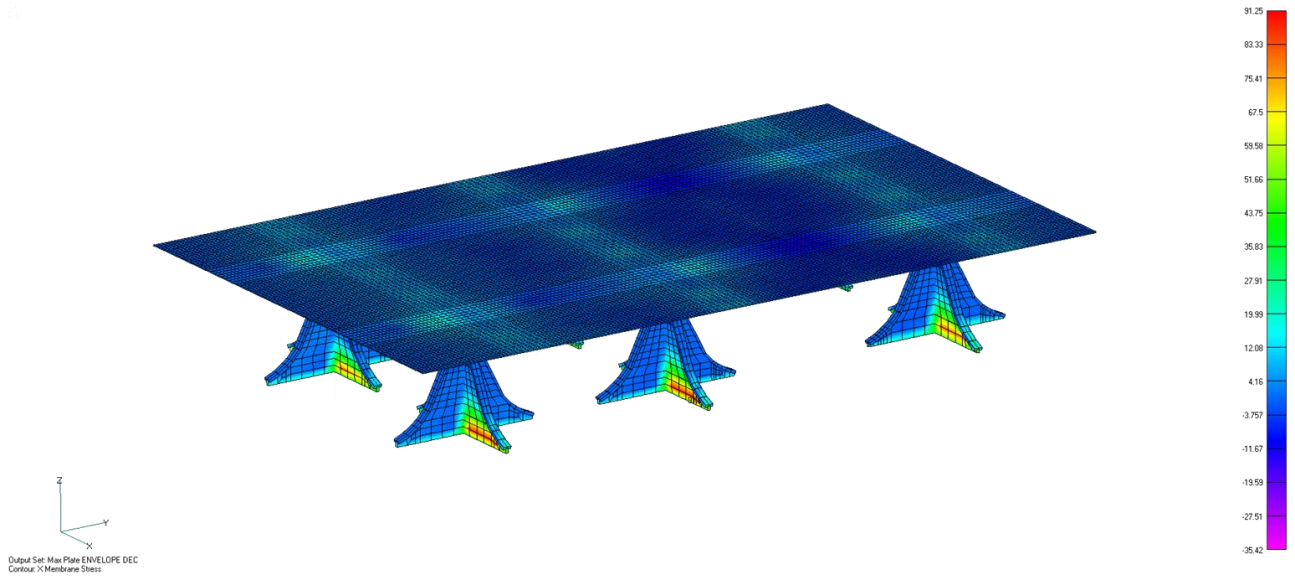


Figura 123: Tensão longitudinal máxima de membrana para DEC ENVELOPE

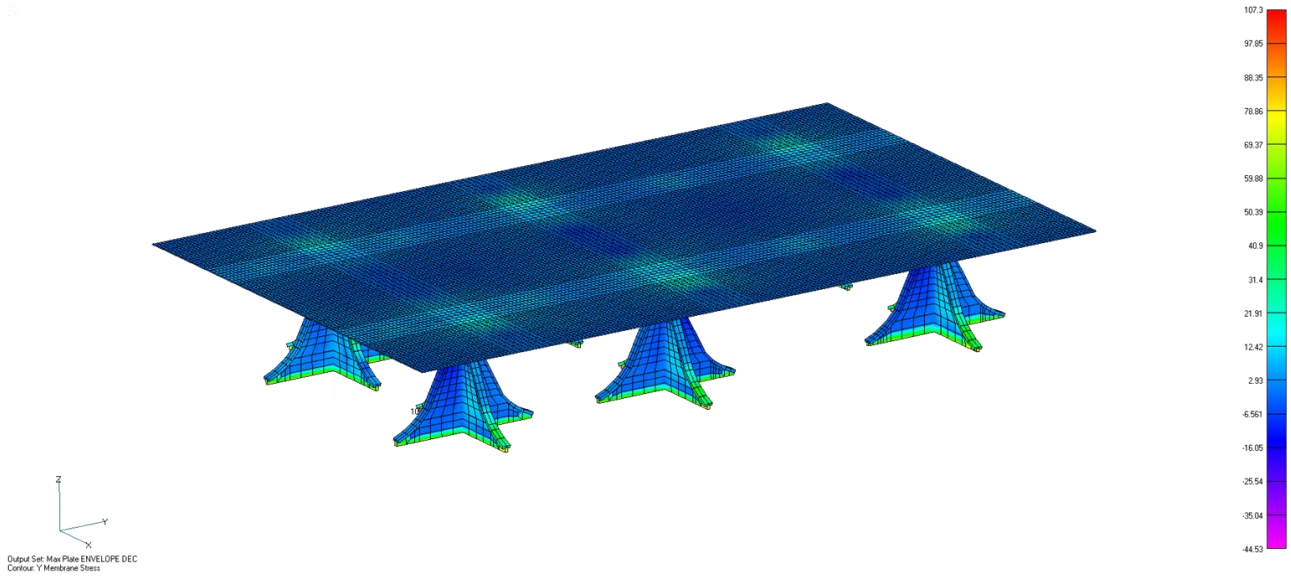


Figura 124: Tensão transversal máxima de membrana para DEC ENVELOPE

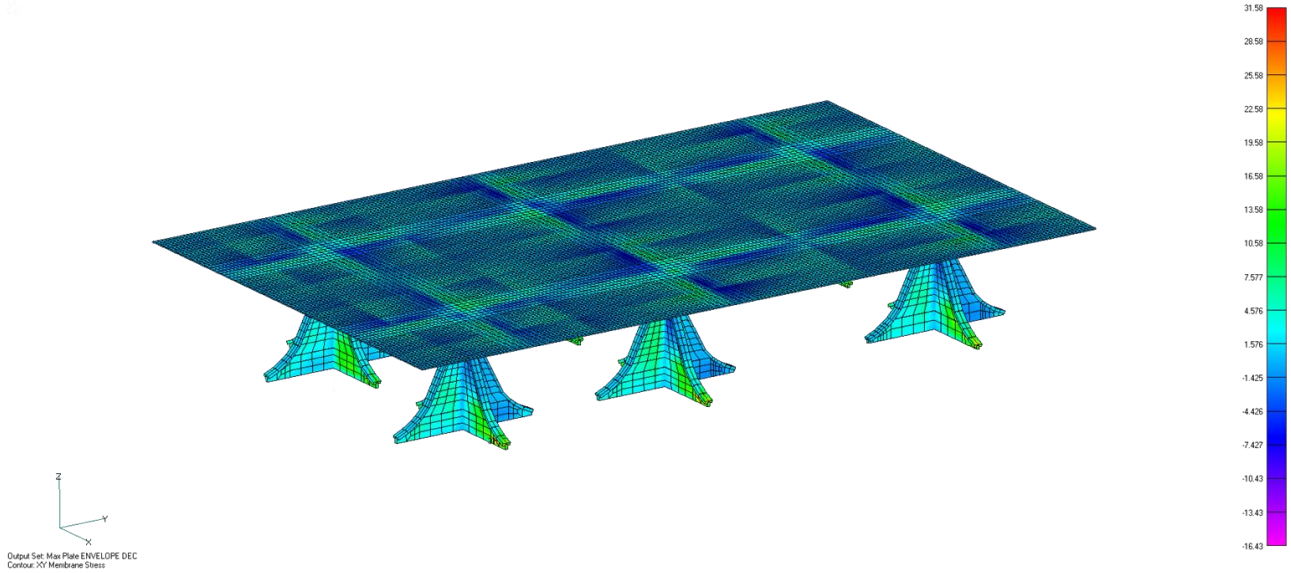


Figura 125: Tensão cisalhante máxima para DEC ENVELOPE

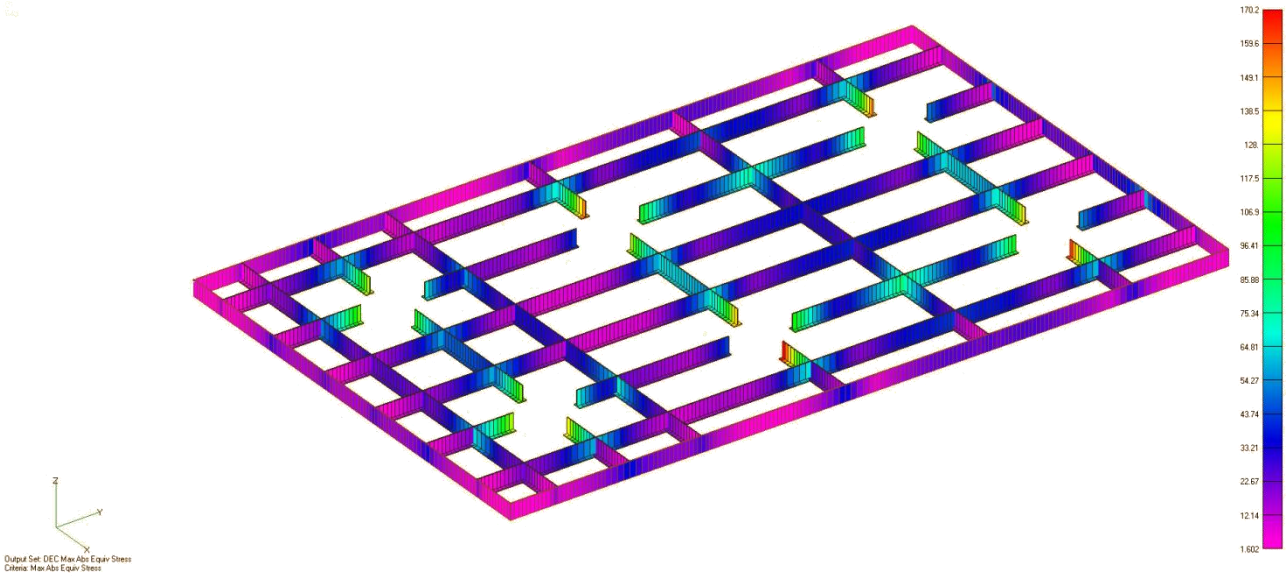


Figura 126: Máxima tensão combinada para DEC ENVELOPE

ANEXO III: *Característica dos paineis e resultados para flambagem*

- Flambagem do painel da *laydown area* considerando compressão

Tabela 14: Características do painel da laydown

Reinforced Panel Characteristics:				**Material Characteristics:**			
s	900.0	mm	plate width or stiffener spacing	E	206000.0	MPa	Modulus of elasticity
l	1800.0	mm	panel length or stiffener length	G	79230.8	MPa	Shear modulus
LG	2700.0	mm	girder length	ν	0.3	-	Poison ratio
t	16.0	mm	plate thickness	γ	1.2	-	Material factor
LP	9000.0	mm	length of stiffened panel	fy	355.0	MPa	Yield stress
panel	Laydown						
Stiffener Characteristics:				**Girder Characteristics:**			
Section Type:		T	(T,L or Flat bar)	Section Type:		T	(T,L or Flat bar)
Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)	Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)
Support:		C	(Continuous, Sniped)	Support:		C	(Continuous, Sniped)
Tension Field Action:		N	(Not allowed, Allowed)	All σy to Girder?:		N	(Yes or No)
tw	12.0	mm	web thickness of stiffener	twG	12.0	mm	web thickness of girder
hw	200.0	mm	web height of stiffener	hwG	100.0	mm	web height of girder
tf	12.0	mm	flange thickness of stiffener	tfG	12.0	mm	flange thickness of girder
b	100.0	mm	flange width of stiffener	bG	100.0	mm	flange width of girder
Loading (Finite Element Model Stress Output):							
σ x,Sd	10.67	MPa	Longitudinal compression	τSd	9.08	MPa	Shear load (always +)
σ y1,Sd	14.67	MPa	Larger Transverse Load (+ for compression)	Psd	0.02500	MPa	Lateral load
Ψ	1	-	(Default : value 1.0)				

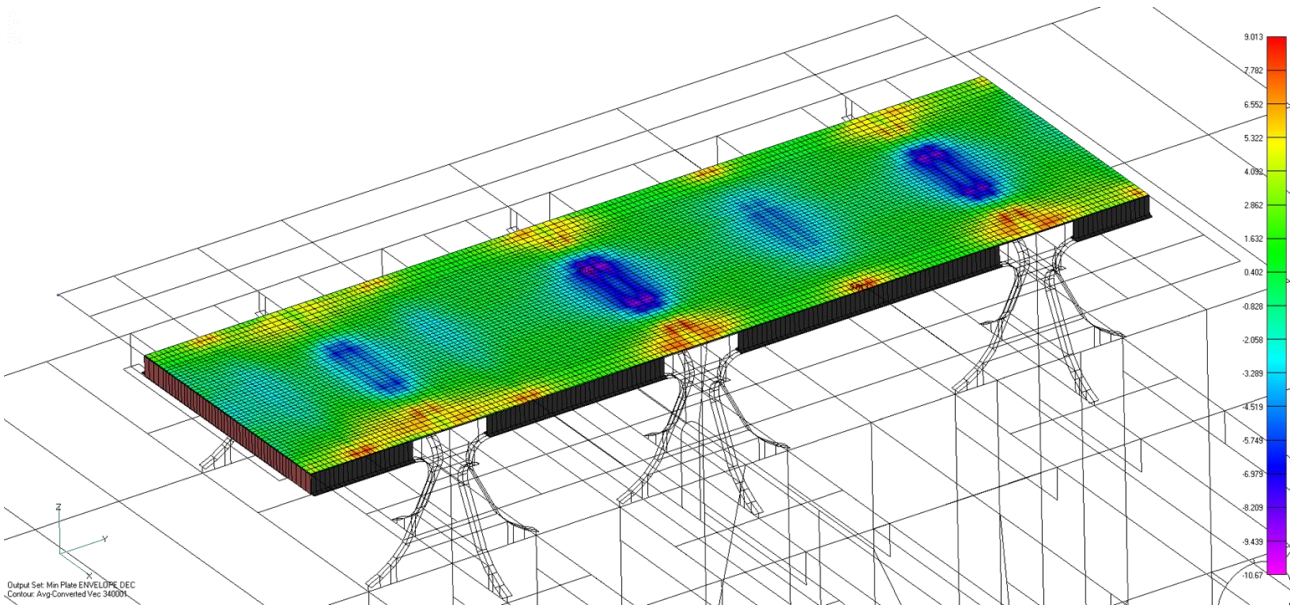


Figura 127: Tensão longitudinal de membrana para DEC ENVELOPE

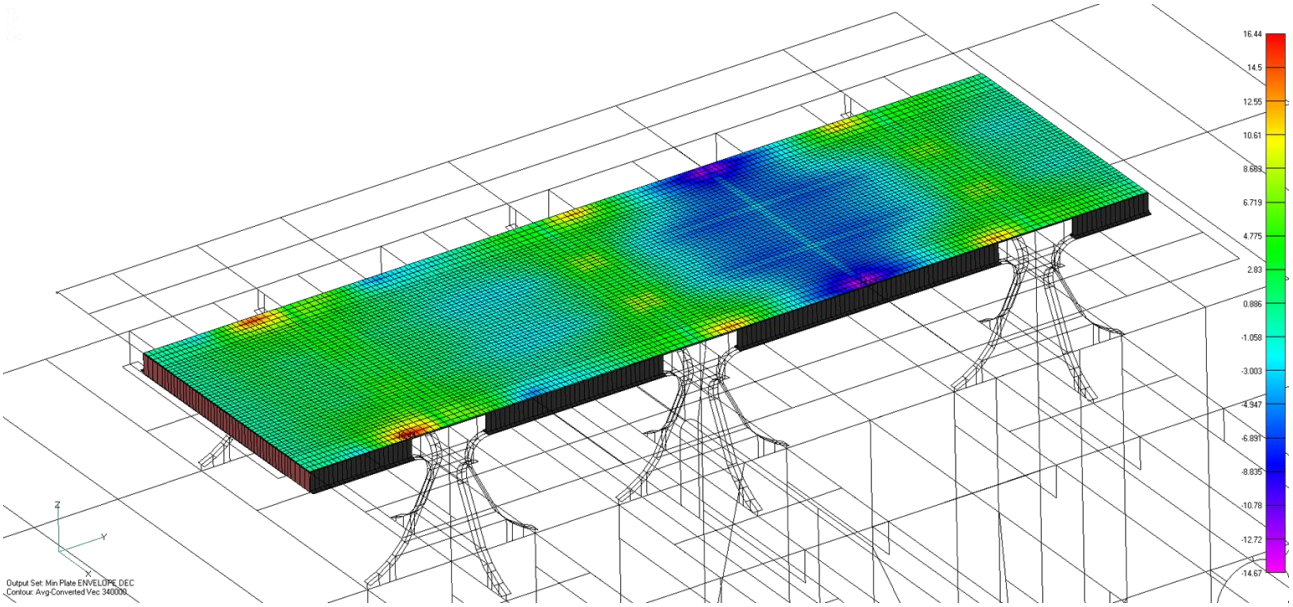


Figura 128: Tensão transversal de membrana para DEC ENVELOPE

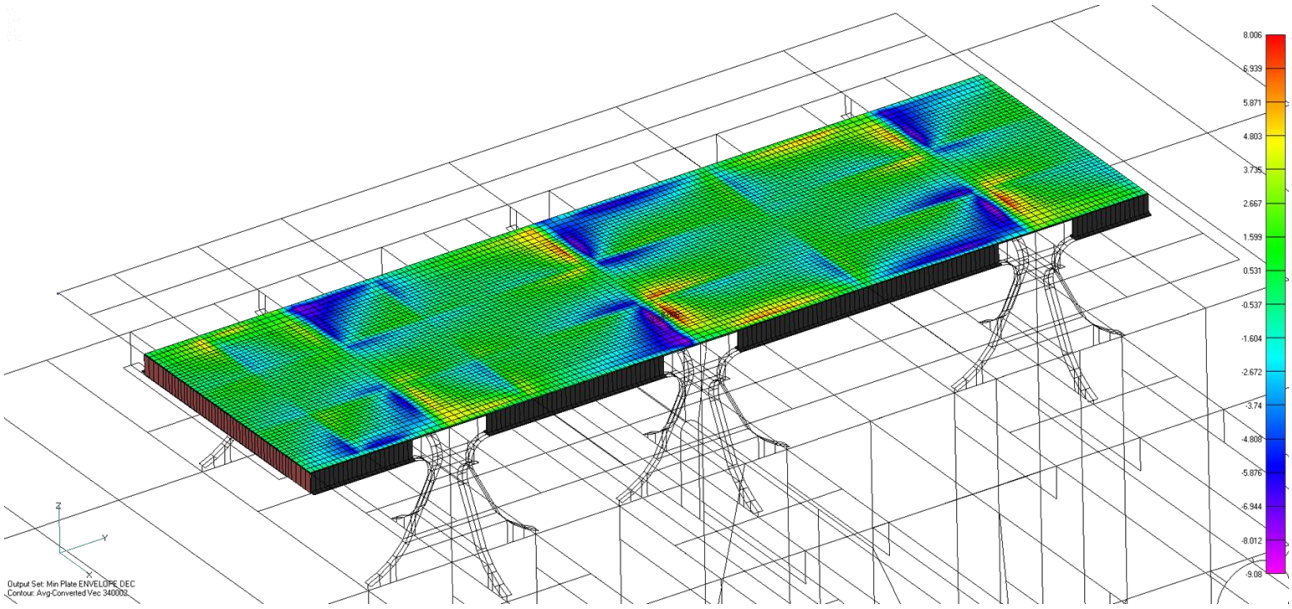


Figura 129: Tensão cisalhante para DEC ENVELOPE

Tabela 15: Resultados para o painel da *laydown area*

Results for reinforced panel:

Lateral loaded plates

$$p_{Sd} \le 4.0 \frac{f_y}{\gamma_M}\left(\frac{t}{s}\right)^2\left[\psi_y + \left(\frac{s}{l}\right)^2 \psi_x\right]$$

Psd =	0.025	<	0.4869 MPa	Pass

Resistance of plate between stiffeners

$$\tau_{Sd} \le \tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}\cdot\gamma_M}$$

τSd =	9.08	<	178.23 MPa	Pass

$$\sigma_{y,Sd} \le k_{sp}\cdot\sigma_{y,Rd}$$

σy,Sd =	14.67	<	118.29 MPa	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Stiffener Check

Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:			
Criteria	**Value**	**Result**	**Criteria**	**Value**	**Result**	
7.50	0.076	Pass	7.54	0.072	Pass	1.187
7.51	-0.038	Pass	7.55	0.076	Pass	1.185
7.52	0.072	Pass	7.56	0.076	Pass	1.177
7.53	0.076	Pass	7.57	-0.038	Pass	

Local buckling of stiffeners

Stiffener web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Stiffener flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	200	<	410.1 mm	Pass

Stiffener Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net}\cdot\frac{f_y}{\gamma_M\sqrt{3}}$$

Stiffener	20250	<	453406 N	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Girder Check

Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:		
Criteria	**Value**	**Result**	**Criteria**	**Value**	**Result**
7.50	0.695	Pass	7.54	0.823	Pass
7.51	0.060	Pass	7.55	0.169	Pass
7.52	0.696	Pass	7.56	0.822	Pass
7.53	0.162	Pass	7.57	0.053	Pass

Local buckling of girders

Girder web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Girder flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	100	<	410.1 mm	Pass

Girder Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net}\cdot\frac{f_y}{\gamma_M\sqrt{3}}$$

Girder:	60750	<	239535 MPa	Pass

- Flambagem do painel da *laydown area* considerando tração

Tabela 16: Características do painel da *laydown area*

Reinforced Panel Characteristics:

s	900.0	mm	plate width or stiffener spacing
l	1800.0	mm	panel length or stiffener length
LG	2700.0	mm	girder length
t	16.0	mm	plate thickness
LP	9000.0	mm	length of stiffened panel
panel	Laydown		

Stiffener Characteristics:

Section Type:	T		(T,L or Flat bar)
Fabrication Method:	W		(Rolled or Welded)
Support:	C		(Continuous, Sniped)
Tension Field Action:	N		(Not allowed, Allowed)
tw	12.0	mm	web thickness of stiffener
hw	200.0	mm	web height of stiffener
tf	12.0	mm	flange thickness of stiffener
b	100.0	mm	flange width of stiffener

Material Characteristics:

E	206000.0	MPa	Modulus of elasticity
G	79230.8	MPa	Shear modulus
ν	0.3	-	Poison ratio
γ	1.2	-	Material factor
fy	355.0	MPa	Yield stress

Girder Characteristics:

Section Type:	T		(T,L or Flat bar)
Fabrication Method:	W		(Rolled or Welded)
Support:	C		(Continuous, Sniped)
All σy to Girder?:	N		(Yes or No)
twG	12.0	mm	web thickness of girder
hwG	100.0	mm	web height of girder
tfG	12.0	mm	flange thickness of girder
bG	100.0	mm	flange width of girder

Loading (Finite Element Model Stress Output):

σx,Sd	-13.48	MPa	Longitudinal compression	τSd	8.888	MPa	Shear load (always +)
σy1,Sd	-17.05	MPa	Larger Transverse Load (+ for compression)	Psd	0.02500	MPa	Lateral load
Ψ	1	-	(Default : value 1.0)				

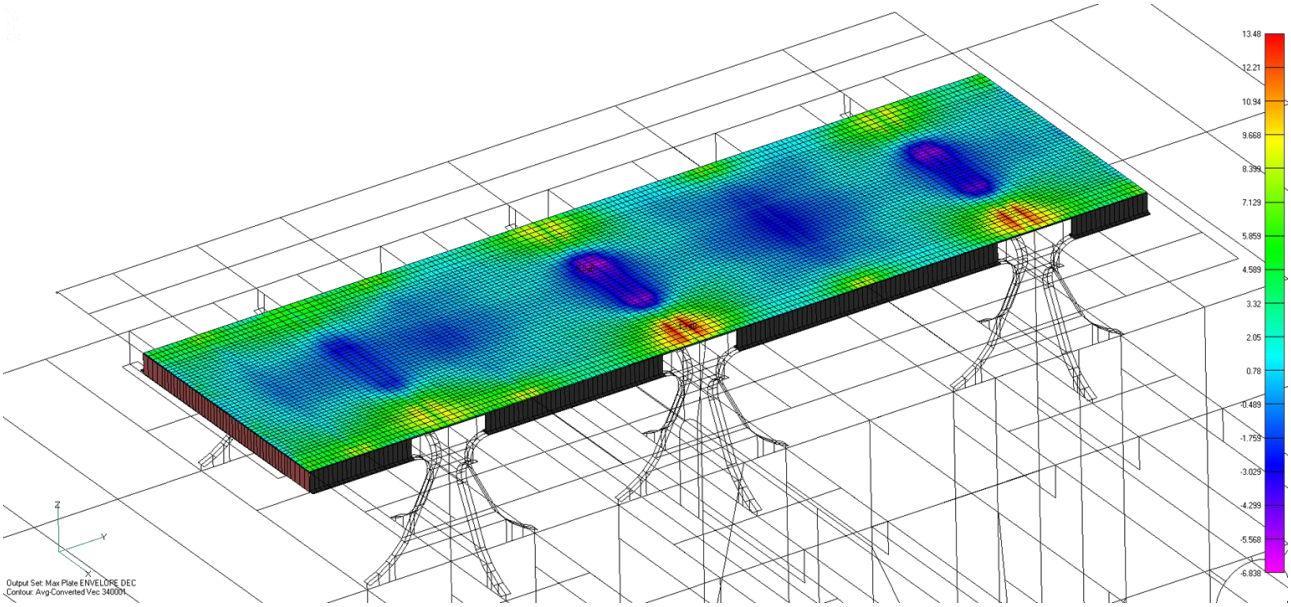


Figura 130: Tensão longitudinal de membrana para DEC ENVELOPE

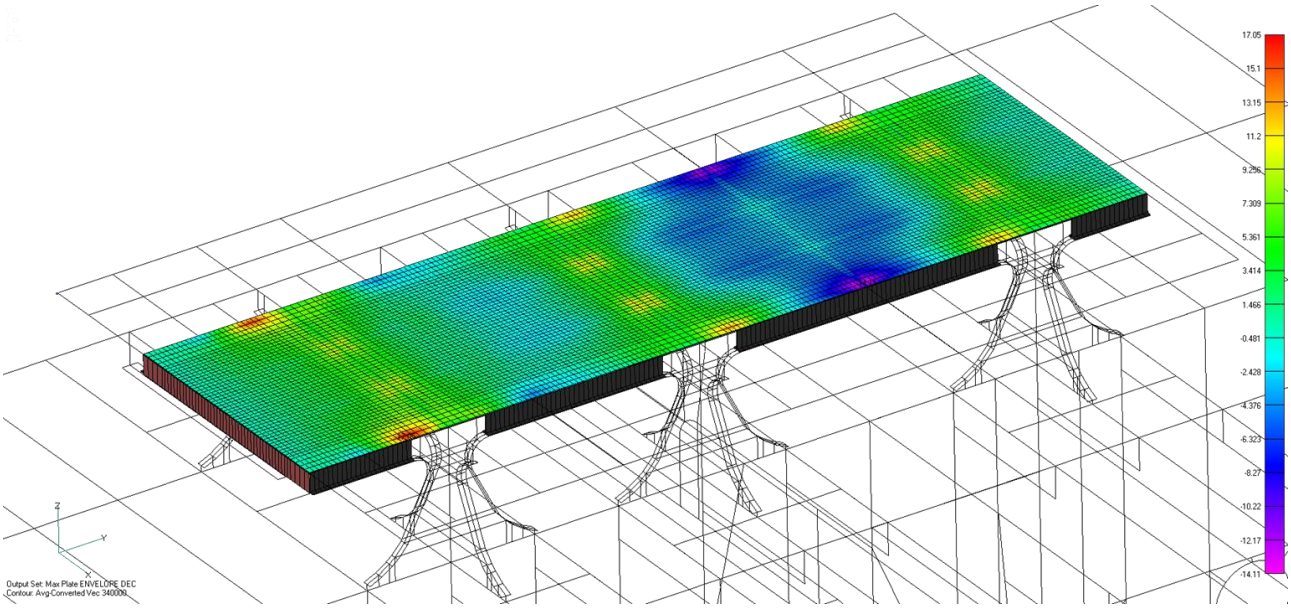


Figura 131: Tensão transversal de membrana para DEC ENVELOPE

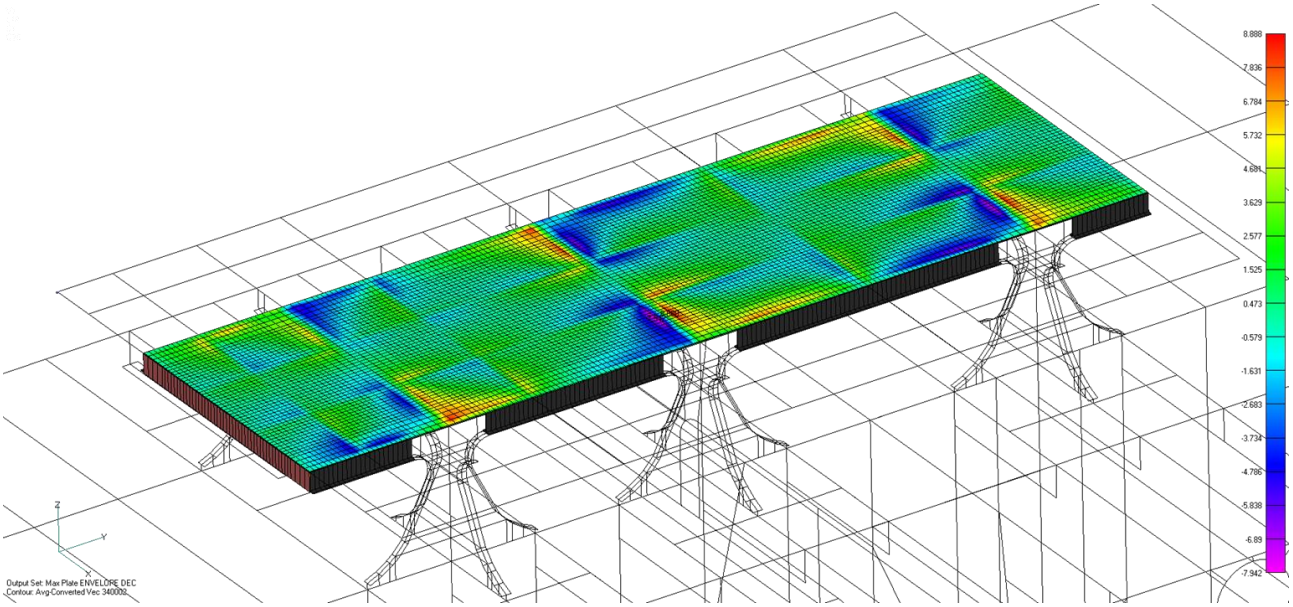


Figura 132: Tensão cisalhante para DEC ENVELOPE

Tabela 17: Resultados para o painel da *laydown area*

Results for reinforced panel:

Lateral loaded plates

$$p_{Sd} \le 4.0 \frac{f_y}{\gamma_M} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \left[\psi_y + \left(\frac{s}{l}\right)^2 \psi_x\right]$$

Psd =	0.025	<	0.4877 MPa	Pass

Resistance of plate between stiffeners

$$\tau_{Sd} \le \tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M}$$

τSd =	8.888	<	178.23 MPa	Pass

$$\sigma_{y,Sd} \le k_{sp} \cdot \sigma_{y,Rd}$$

σy,Sd =	-17.05	<	118.29 MPa	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Stiffener Check

Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:			
Criteria	**Value**	**Result**	**Criteria**	**Value**	**Result**	
7.50	-0.008	Pass	7.54	0.073	Pass	1.187
7.51	0.073	Pass	7.55	-0.057	Pass	1.185
7.52	0.072	Pass	7.56	-0.008	Pass	1.177
7.53	-0.057	Pass	7.57	0.073	Pass	

Local buckling of stiffeners

Stiffener web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Stiffener flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	200	<	410.1 mm	Pass

Stiffener Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M \sqrt{3}}$$

Stiffener	20250	<	453406 N	Pass

Interaction formulas for axial compression and lateral pressure

Girder Check

Lateral pressure on plate side:			Lateral pressure on stiffener side:		
Criteria	**Value**	**Result**	**Criteria**	**Value**	**Result**
7.50	0.122	Pass	7.54	0.222	Pass
7.51	-0.016	Pass	7.55	-0.127	Pass
7.52	0.121	Pass	7.56	0.223	Pass
7.53	-0.133	Pass	7.57	-0.022	Pass

Local buckling of girders

Girder web local buckling check

$c \le 15\, t_f\, \varepsilon$ for rolled sections $c \le 14\, t_f\, \varepsilon$ for welded sections

c =	44	<	136.7 mm	Pass

Girder flange web local buckling check

$h_w \le 42\, t_w\, \varepsilon$

hw =	100	<	410.1 mm	Pass

Girder Check for Shear Force

$$V_{Sd} \le V_{Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M \sqrt{3}}$$

Girder:	60750	<	239535 MPa	Pass

- Flambagem do painel do *stool* considerando compressão

Tabela 18: Características do painel do *stool*

Reinforced Panel Characteristics:				**Material Characteristics:**			
s	200.0	mm	plate width or stiffener spacing	E	206000.0	MPa	Modulus of elasticity
l	1350.0	mm	panel length or stiffener length	G	79230.8	MPa	Shear modulus
LG	200.0	mm	girder length	ν	0.3	-	Poison ratio
t	30.0	mm	plate thickness	γ	1.2	-	Material factor
LP	1350.0	mm	length of stiffened panel	fy	355.0	MPa	Yield stress
panel	Stool						
Stiffener Characteristics:				**Girder Characteristics:**			
Section Type:		T	(T,L or Flat bar)	Section Type:		T	(T,L or Flat bar)
Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)	Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)
Support:		C	(Continuous, Sniped)	Support:		C	(Continuous, Sniped)
Tension Field Action:		N	(Not allowed, Allowed)	All σy to Girder?:		N	(Yes or No)
tw		mm	web thickness of stiffener	twG		mm	web thickness of girder
hw		mm	web height of stiffener	hwG		mm	web height of girder
tf		mm	flange thickness of stiffener	tfG		mm	flange thickness of girder
b		mm	flange width of stiffener	bG		mm	flange width of girder
Loading (Finite Element Model Stress Output):							
σ x,Sd	103.2	MPa	Longitudinal compression	τSd	38.87	MPa	Shear load (always +)
σ y1,Sd	96.79	MPa	Larger Transverse Load (+ for compression)	Psd		MPa	Lateral load
Ψ	1	-	(Default : value 1.0)				

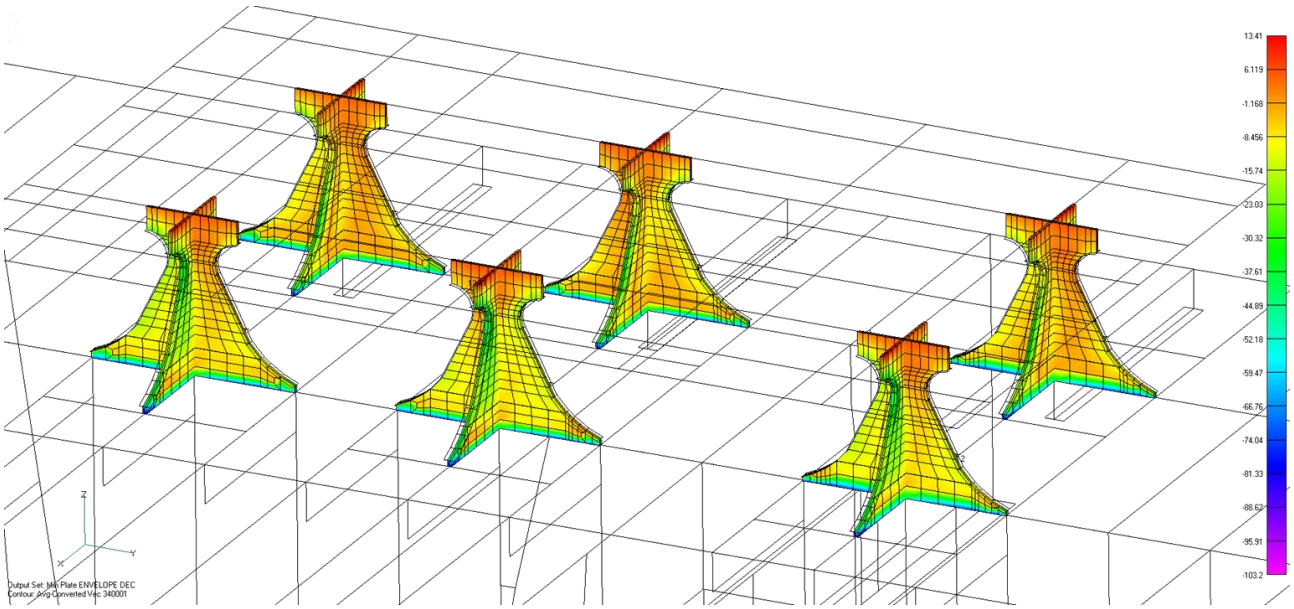


Figura 133: Tensão longitudinal de membrana para DEC ENVELOPE

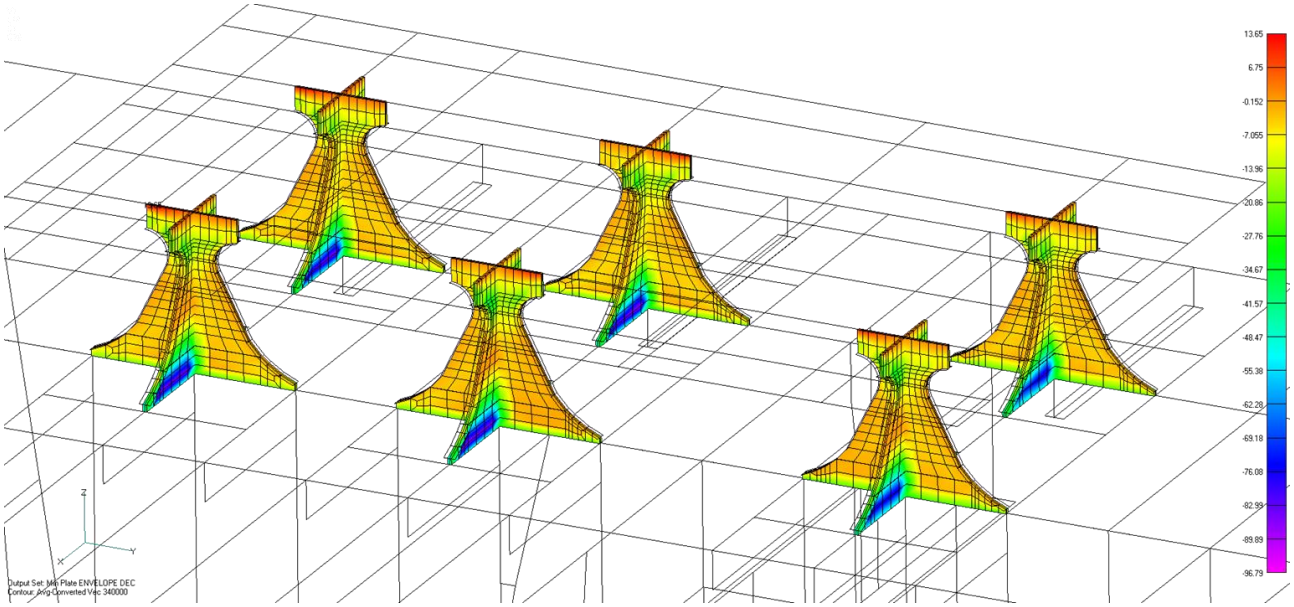


Figura 134: Tensão transversal de membrana para DEC ENVELOPE

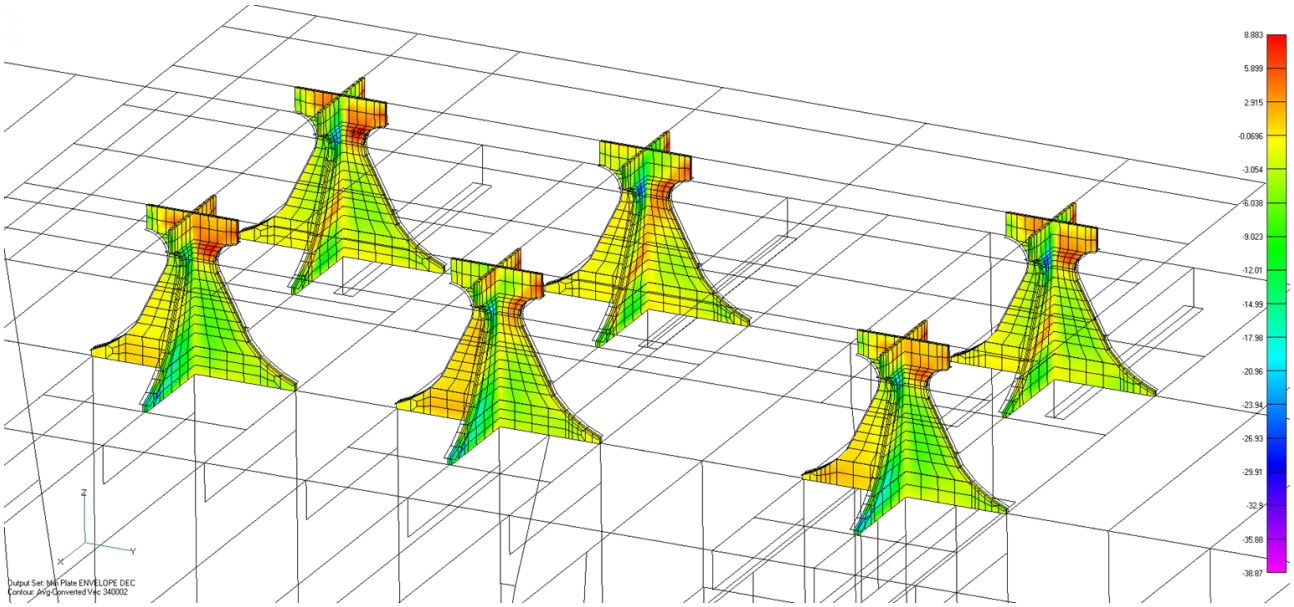


Figura 135: Tensão cisalhante para DEC ENVELOPE

Tabela 19: Resultados do painel do *stool*

Results for unstiffened plates:								
Buckling resistance of the plate due to longitudinal compression					Buckling resistance of the plate due to transverse compression			
$\sigma_{x,Sd} \leq \sigma_{x,Rd}$					$\sigma_{y,Sd} \leq \sigma_{y,Rd}$			
σ x,Sd=	103.2	<=	308.70 MPa	Pass	σ y,Sd=	96.79	<=	306.49 MPa	Pass
Buckling resistance of a plate due to shear					Buckling of biaxially loaded plate with shear			
$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd}$					$\left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right)^2 - c_i \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Sd}}{\tau_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0$			0.16	Pass
τSd=	38.87	<=	178.23 MPa	Pass					

- Flambagem do painel do *stool* considerando tração

Tabela 20: Características do painel do *stool*

Reinforced Panel Characteristics:				**Material Characteristics:**			
s	200.0	mm	plate width or stiffener spacing	E	206000.0	MPa	Modulus of elasticity
l	1350.0	mm	panel length or stiffener length	G	79230.8	MPa	Shear modulus
LG	200.0	mm	girder length	ν	0.3	-	Poison ratio
t	30.0	mm	plate thickness	γ	1.2	-	Material factor
LP	1350.0	mm	length of stiffened panel	fy	355.0	MPa	Yield stress
panel	Stool						
Stiffener Characteristics:				**Girder Characteristics:**			
Section Type:		T	(T,L or Flat bar)	Section Type:		T	(T,L or Flat bar)
Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)	Fabrication Method:		W	(Rolled or Welded)
Support:		C	(Continuous, Sniped)	Support:		C	(Continuous, Sniped)
Tension Field Action:		N	(Not allowed, Allowed)	All σy to Girder?:		N	(Yes or No)
tw		mm	web thickness of stiffener	twG		mm	web thickness of girder
hw		mm	web height of stiffener	hwG		mm	web height of girder
tf		mm	flange thickness of stiffener	tfG		mm	flange thickness of girder
b		mm	flange width of stiffener	bG		mm	flange width of girder
Loading (Finite Element Model Stress Output):							
σ x,Sd	103.2	MPa	Longitudinal compression	τSd	38.87	MPa	Shear load (always +)
σ y1,Sd	96.79	MPa	Larger Transverse Load (+ for compression)	Psd		MPa	Lateral load
Ψ	1	-	(Default : value 1.0)				

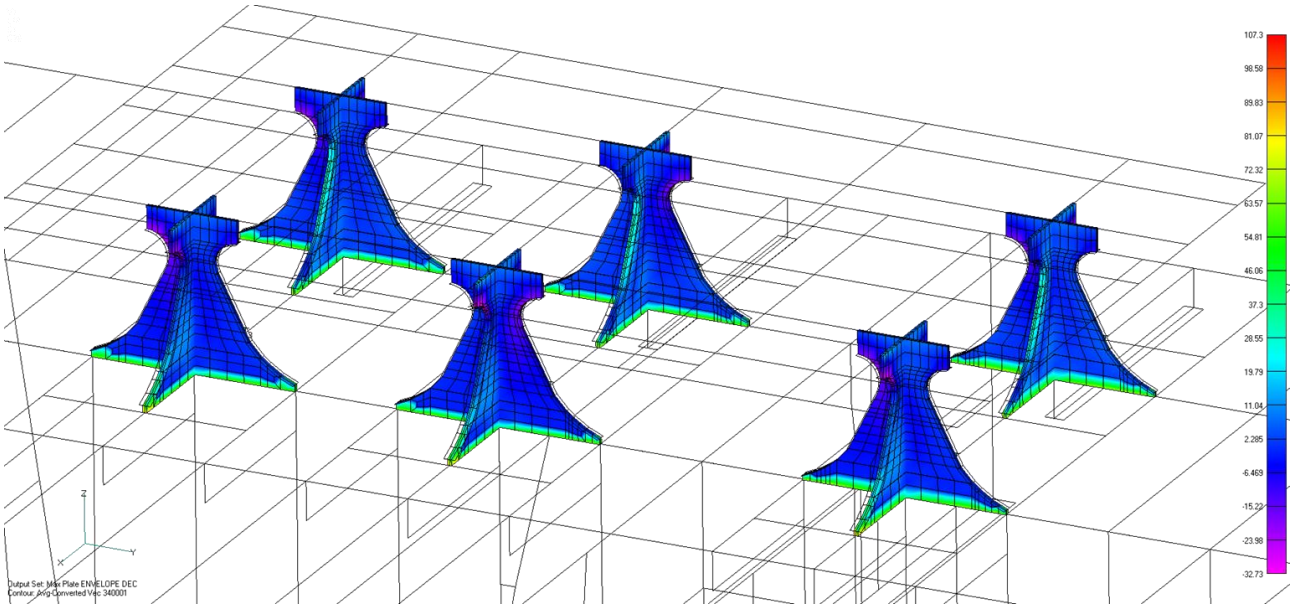


Figura 136: Tensão longitudinal de membrana para DEC ENVELOPE

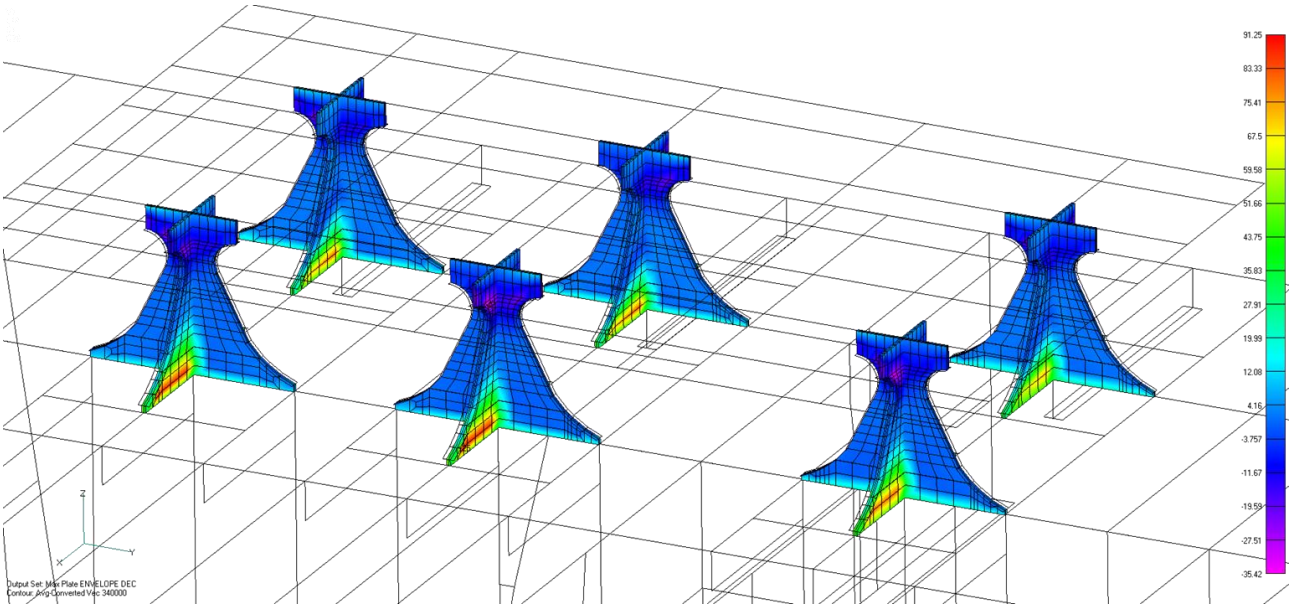


Figura 137: Tensão transversal de membrana para DEC ENVELOPE

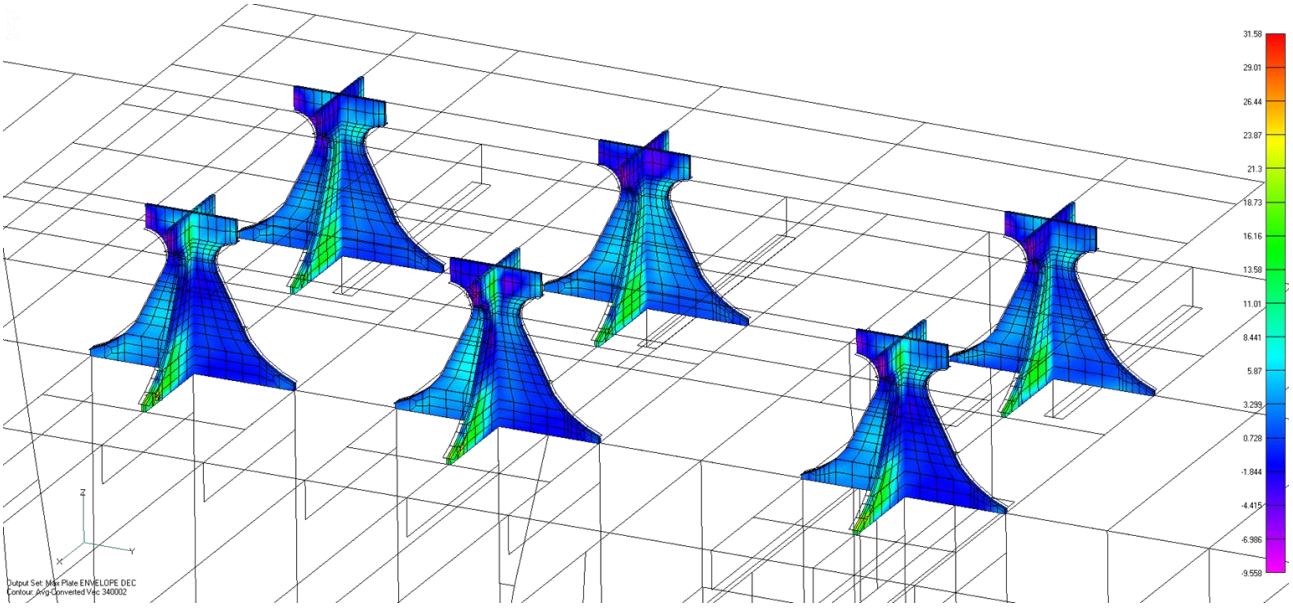


Figura 138: Tensão cisalhante para DEC ENVELOPE

Tabela 21: Resultados para o painel do *stool*

Results for unstiffened plates:									
Buckling resistance of the plate due to longitudinal compression					Buckling resistance of the plate due to transverse compression				
$\sigma_{x,Sd} \leq \sigma_{x,Rd}$					$\sigma_{y,Sd} \leq \sigma_{y,Rd}$				
σ x,Sd=	103.2	<=	308.70 MPa	Pass	σ y,Sd=	96.79	<=	306.49 MPa	Pass
Buckling resistance of a plate due to shear					Buckling of biaxially loaded plate with shear				
$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd}$					$\left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right)^2 - c_i \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Sd}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Sd}}{\tau_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0$			0.16	Pass
τSd=	38.87	<=	178.23 MPa	Pass					

ANEXO IV: *Resultados para análise de fadiga*

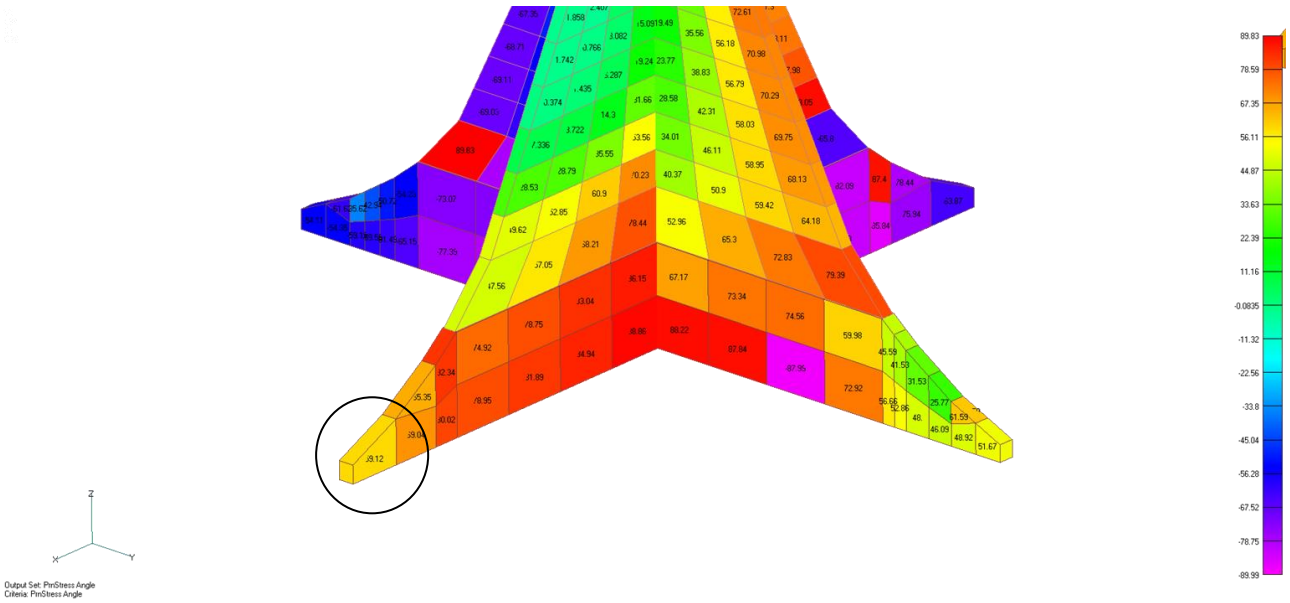


Figura 139: Ângulo da tensão principal (59,12 graus)

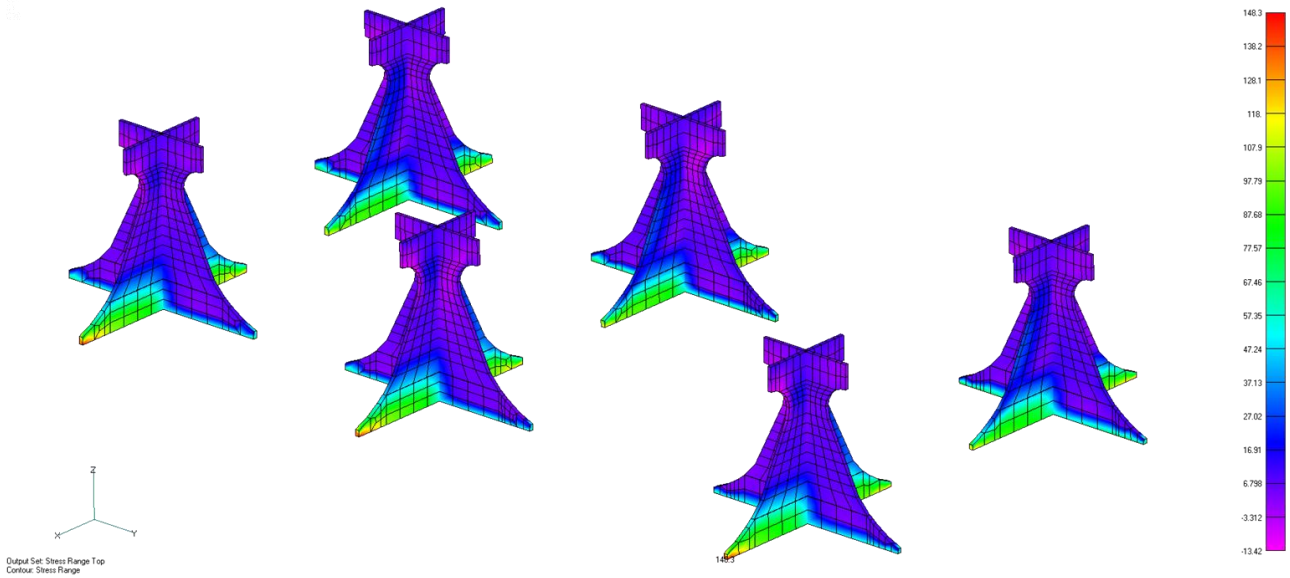


Figura 140: Top Stress Range

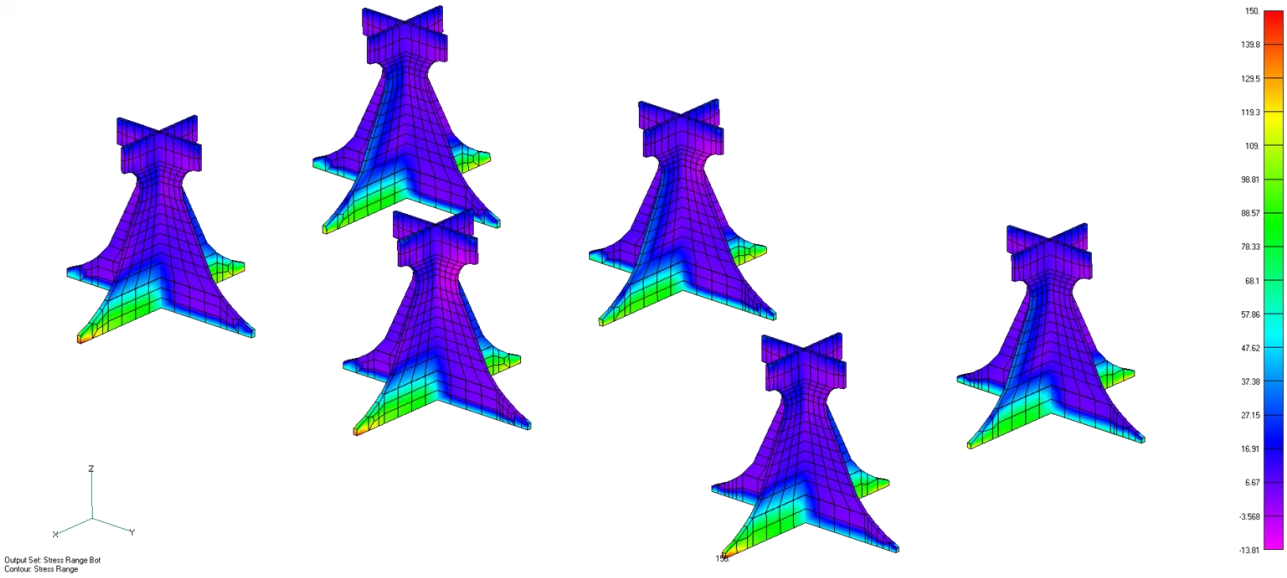


Figura 141: Bottom Stress Range